

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Inovace laboratorní úlohy**  
**Laboratory Job Innovation**

## Zadání bakalářské práce

Student: **Miroslav Koval**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika  
Téma: Inovace laboratorní úlohy  
Laboratory Job Inovation

Zásady pro vypracování.

Popis stávajícího stavu laboratorní úlohy

Související předpisy a normy, bezpečnost práce.

Komplexní rozbor laboratorní úlohy pro měření parametrů vybraného elektrického stroje.

Provedení měření, návod a vzorový protokol, vyhodnocení úlohy

Seznam doporučené odborné literatury

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Bernat, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry

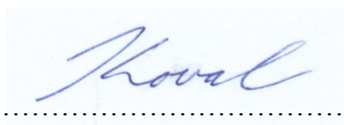


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7. 5. 2015



.....

Koval

---

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Petru Bernatovi, Ph.D. za poskytnuté rady a informace při tvorbě bakalářské práce. Dále bych poděkoval také panu Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za odborné vedení a informace v dané problematice při měření.

**Obsah**

Abstrakt.....	6
Klíčová slova.....	6
Abstract.....	6
Key words .....	6
Přehled použitých symbolů a značek .....	7
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	10
1. Úvod.....	11
2. Princip činnosti synchronního stroje .....	11
2.1. Moment synchronního stroje s hladkým rotorem .....	13
2.2. Moment synchronního stroje s vyjádřenými póly .....	14
3. Spouštění synchronního motoru.....	15
3.1. Asynchronní rozběh.....	15
3.2. Rozběh pomocným motorem .....	15
3.3. Řízený rozběh.....	16
4. Zkrat synchronního stroje .....	16
5. Rozsah zkoušek.....	17
5.1. Typová zkouška.....	17
5.1.1. Dílčí normy pro typovou zkoušku.....	18
5.2. Kontrolní kusová zkouška .....	19
5.2.1. Dílčí normy pro kusovou zkoušku .....	19
5.3. Přejímací zkouška.....	19
5.4. Základní mechanická zkouška.....	19
5.5. Měření izolačního odporu .....	20
5.6. Měření činného odporu za studena .....	20
5.7. Zkouška závitové izolace .....	21
5.8. Zkouška vinutí přiloženým napětím .....	21
5.9. Oteplovací zkouška.....	21
5.10. Určení reaktancí $X'd$ , $X''d$ a časových konstant .....	22
5.11. Měření polarizačního indexu .....	22
6. Měření charakteristik.....	23
6.1. Měření naprázdno.....	23

6.2.	Charakteristika naprázdno.....	23
6.3.	Měření nakrátko .....	24
6.4.	Charakteristika nakrátko .....	25
7.	Měření na synchronních generátorech.....	26
7.1.	Měření naprázdno: .....	29
7.2.	Měření nakrátko: .....	30
7.3.	Měření reaktancí skluzovou metodou: .....	31
7.4.	Měření nulové složky: .....	33
7.5.	Měření náhlého zkratu: .....	35
7.6.	Měření „V-křivek“ .....	36
7.7.	Měření teploty .....	37
7.8.	Použité měřicí přístroje .....	39
Závěr .....		40
Literatura .....		42
Přílohy .....		43

**ABSTRAKT**

Tato práce se zaměřuje na problematiku měření na synchronních generátorech s využitím platných norem pro správné vyhodnocení.

V první části bakalářské práce jsou rozebrány základní informace a princip synchronního stroje. Dále jsou popsána jednotlivá měření a rozbor norem.

V druhé části práce se zabývám měřením na konkrétních typech synchronních generátorů používaných v laboratořích školy. Taktéž podle kritérií vyplývajících z normy a možností školy jsou provedena příslušná měření.

**KLÍČOVÁ SLOVA**

Stroj, motor, generátor, stator, rotor, vlastnosti, princip, výkon, účinnost, účinník, norma, synchronní, reaktance, zkrat, měření, zkouška, naprázdno, nakrátko, charakteristika.

**ABSTRACT**

This work focuses on the problem of measurement for synchronous generator using the applicable standards for proper evaluation.

In the first part of the work analyzed basic information and the principle of synchronous machine. The description of the measurement and analysis of standards.

The second part deals with the measurement on the specific types of synchronous generators used in the laboratories of the school. Also according to the criteria resulting from the norm options and schools are made relevant measures.

**KEY WORDS**

Machine, engine, generator, stator, rotor, properties, principle, performance, efficiency, power factor, standard, synchronous, reactance, short circuit, measurement, test, idle, short, characteristics.

**PŘEHLED POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK**

$n$	otáčky rotoru synchronního stroje
$\omega$	úhlová rychlost
$f_1$	jmenovitá frekvence napájecího napětí statoru
$f_n$	jmenovitá frekvence
$n_{s1}$	otáčky vzniklého magnetického pole
$n$	otáčky rotoru synchronního stroje
$p$	počet pólů
$k_V$	činitel vinutí
$\phi$	magnetický tok
$N_1$	počet závitů na cívce
$P$	činný výkon
$P_N$	jmenovitý výkon
$S$	zdánlivý výkon
$U$	napětí
$I$	proud
$\cos \varphi$	účinník
$s$	skluz
$M$	moment
$M_n$	jmenovitý moment
$U_n$	jmenovité napětí
$U_{zk}$	zkušební napětí
$X_d$	synchronní reaktance
$\beta$	zátěžný úhel
$\Phi$	magnetický tok
$\eta$	účinnost
$\Delta P$	ztráty
$R_{(0)}$	odpor nulové složky
$X_{(0)}$	nulová reaktance
$X_{(1)}$	sousledná reaktance

$X_{(2)}$	zpětná reaktance
$X_d$	podélná synchronní reaktance
$X_d'$	přechodná podélná reaktance
$X_d''$	rázová podélná reaktance
$X_q$	příčná synchronní reaktance
$\tau_d'$	přechodná podélná časová konstanta zkratu
$\tau_d''$	rázová podélná časová konstanta zkratu
$A_0$	chod naprázdno, otáčky odpovídají skluzu naprázdno
$Z$	impedance
$Z_N$	jmenovitá impedance
$R_{iz}$	izolační odpor
$R_{20}$	odpor vinutí při 20°C
$R$	odpor vinutí při teplotě $\vartheta$
$\vartheta$	teplota vinutí při měření
$\theta_1$	teplota vinutí v okamžiku měření počátečního odporu
$\theta_2$	teplota vinutí na konci oteplovací zkoušky
$\theta_x$	teplota chladiva na konci oteplovací zkoušky
$R_1$	odpor vinutí při teplotě $\theta_1$
$R_2$	odpor vinutí na konci oteplovací zkoušky
$k$	převrácená hodnota teplotního součinitele odporu při 0 °C materiálu vodiče
$R_{60}$	izolační odpor po 60s
$R_{600}$	izolační odpor po 600s



**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. - Princip činnosti alternátoru a průběh indukovaného napětí v cívkách kotvy .....	12
Obr. 2. - Zjednodušené náhradní schéma a fázorový diagram synchronního stroje .....	13
Obr. 3. - Moment synchronního stroje s hladkým rotorem .....	14
Obr. 4. - Moment synchronního stroje s vyjádřenými póly v závislosti na zátěžném úhlu.....	15
Obr. 5. - Průběh zkratového proudu generátoru .....	17
Obr. 6. - Charakteristika naprázdno .....	24
Obr. 7. - Charakteristika nakrátko.....	25
Obr. 8. - Štítek 1. Synchronního generátoru .....	26
Obr. 9. - 1. Synchronní generátor .....	26
Obr. 10. - Štítek 2. Synchronního generátoru .....	27
Obr. 11. - 2. Synchronní generátor .....	27
Obr. 12. - Měřicí pult pro 1.SG .....	28
Obr. 13. - Měřicí pult pro 2.SG .....	28
Obr. 14. - Schéma zapojení pro měření charakteristiky naprázdno .....	29
Obr. 15. - Schéma zapojení pro měření charakteristiky nakrátko.....	30
Obr. 16. - Schéma zapojení pro měření skluzové metody.....	31
Obr. 17. - Přibližné znázornění průběhu výchylek napětí a proudů.....	33
Obr. 18. - Schéma zapojení pro měření nulové složky .....	33
Obr. 19. - Schéma zapojení pro měření náhlého zkratu .....	35
Obr. 20. - Schéma zapojení pro měření V-křivek.....	36
Obr. 21. - Spojení a značení svorek .....	37
Obr. 22. - Grafy průběhů naprázdno a nakrátko 1.SG .....	47
Obr. 23. - Grafy průběhů naprázdno a nakrátko 2.SG .....	51
Obr. 24. - Průběh zkratového proudu jedné fáze neupravovaný.....	52
Obr. 25. - Průběh zkratového proudu jedné fáze a obalové křivky zkratového proudu 1.SG.....	53
Obr. 26. - Určení reaktancí a časových konstant zkratového proud 1.SG.....	56
Obr. 27. - Graf průběhu V-křivek 1.SG .....	58
Obr. 28. - Průběh 3-fázového zkratového proudu pro 2.SG.....	59
Obr. 29. - Průběh zkratového proudu jedné fáze a obalové křivky zkratového proudu.....	60
Obr. 30. - Určení reaktancí a časových konstant zkratového proudu 2.SG.....	63

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. - Výčet norem pro typovou zkoušku .....	18
Tab. 2. - Výčet norem pro kusovou zkoušku.....	19
Tab. 3. - Změřené odpory pro 1.SG .....	38
Tab. 4. - Změřené odpory pro 2.SG .....	38
Tab. 5. - Měření naprázdno 1.SG.....	44
Tab. 6. - Algebraické průměry z přibuzování a odbuzování 1.SG.....	44
Tab. 7. - Střední hodnoty z algebraických průměrů 1.SG .....	44
Tab. 8. - Měření 3-pólového spojení nakrátko 1.SG.....	45
Tab. 9. - Měření 2-pólového spojení nakrátko 1.SG.....	45
Tab. 10. - Měření 1-pólového spojení nakrátko 1.SG.....	45
Tab. 11. - Algebraický průměr 3-pólového měření nakrátko 1.SG .....	45
Tab. 12. - Algebraický průměr 2-pólového měření nakrátko 1.SG .....	45
Tab. 13. - Algebraický průměr 1-pólového měření nakrátko 1.SG .....	45
Tab. 14. - Měření naprázdno 2.SG.....	48
Tab. 15. - Algebraické průměry z přibuzování a odbuzování 2.SG.....	48
Tab. 16. - Střední hodnoty z algebraických průměrů 2.SG .....	48
Tab. 17. - Měření 3-pólového spojení nakrátko 2.SG.....	49
Tab. 18. - Měření 2-pólového spojení nakrátko 2.SG.....	49
Tab. 19. - Měření 1-pólového spojení nakrátko 2.SG.....	49
Tab. 20. - Algebraický průměr 3-pólového měření nakrátko 2.SG .....	49
Tab. 21. - Algebraický průměr 2-pólového měření nakrátko 2.SG .....	49
Tab. 22. - Algebraický průměr 1-pólového měření nakrátko 2.SG .....	49
Tab. 23. - Změřené hodnoty pro $P=0\text{kW}$ 1.SG.....	57
Tab. 24. - Změřené hodnoty pro $P=5\text{kW}$ 1.SG.....	57
Tab. 25. - Změřené hodnoty pro $P=10\text{kW}$ 1.SG.....	57

## 1. Úvod

Synchronní generátory tvoří pevnou základnu pro výrobu elektrické energie, dosahujících vysokých výkonů, v průmyslu se užívají i takové synchronní motory, které mohou pracovat v motorickém režimu a dodávají jalový proud, čímž odlehčují generátorům od jejich výroby. Taktéž nalézají uplatnění jako synchronní kompenzátory, které mohou sloužit ke spotřebě nebo k výrobě jalové energie, tímto způsobem se udržuje síť v potřebných mezích.

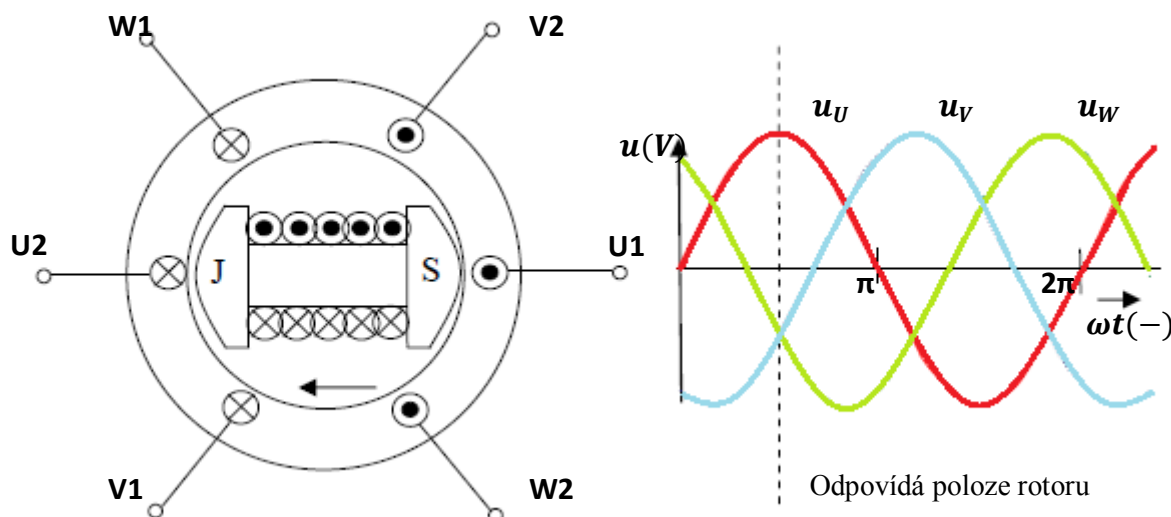
Synchronní stroje se taktéž užívají jako motory pro pohon různých zařízení. Nevýhodou těchto motorů je složitější spouštění a řízení rychlosti.

V této práci se zaměřuji na zkoušení synchronních generátorů, tedy na určování veličin, podle platné normy ČSN 35 0000. Je zde popsán výčet základních měření používaných při zkouškách typových a kusových.

Dále je analyzován základní princip synchronního stroje, rozsah norem a zkoušky pro správné a bezpečné měření. Popisují se zde měření charakteristik naprázdno, nakrátko, náhlý 3-fázový zkrat při odpovídajícím nabuzení pro určení reaktancí a časových konstant. Určují se reaktance pomocí skluzové metody, nulové složky, oteplení, V-křivky a vyhodnocují se výpočty pro odpovídající měření.

## 2. Princip činnosti synchronního stroje

Podle Obr. 1 můžeme vidět, že statorové vinutí generátoru (dvoupólového) je tvořeno třemi cívkami (U, V, W), které jsou vůči sobě pootočené o  $120^\circ$ . Pro nabuzení takového stroje musíme rotor napájet stejnosměrným proudem, tento proud vybudí magnetické pole, které indukuje v cívkách střídavé napětí a následným otáčením rotoru se bude měnit velikost magnetického toku, tento tok je sinusový a v cívkách je časově posunut o  $120^\circ$  jak lze vidět na Obr. 1. Při dané poloze rotoru z obrázku se bude do cívky U indukovat max. napětí, kdežto v cívkách W a V se bude indukovat napětí s opačným znaménkem, při dalším pootočení rotoru o úhel  $120^\circ$  se max. napětí naindukují do cívky V a při dalším pootočení do cívky W. Takto lze z průběhu vidět, že jedna otáčka rotoru odpovídá jedné periodě indukovaného střídavého napětí. [4]



Obr. 1. - Princip činnosti alternátoru a průběh indukovaného napětí v cívkách kotvy

Pro dvoj pólový alternátor tedy platí vztah:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \Rightarrow T = \frac{60}{n} \quad \text{tedy} \quad f_1 = \frac{1}{T} \Rightarrow f_1 = \frac{n}{60} \text{ (Hz, min}^{-1}\text{)}$$

$n$  - otáčky rotoru synchronního stroje

$\omega$  - úhlová rychlost

$f_1$  - frekvence indukovaného napětí do statoru (kotvy)

Obecně pro  $p$ -pólový alternátor:

$$f_1 = p \cdot \frac{n}{60} \text{ (Hz, min}^{-1}\text{)}$$

$p$  – počet pólových dvojic

Připojí-li se ke svorkám vinutí statoru trojfázová zátěž, vinutím statoru bude procházet střídavý elektrický proud, jehož směr je dán Lenzovým zákonem (*Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou*). Tím, že vinutím statoru prochází střídavý trojfázový proud, vzniká stejně jako u asynchronního stroje točivé magnetické pole s otáčkami  $n_{s1}$ , které má stejnou rychlost otáčení jako rotor a jeho magnetické pole. Skluz stroje (tedy rozdíl otáček) je tedy nulový, proto se nazývá synchronní. [4]

$$n_{s1} = n, s = 0 \quad f_1 = p \cdot \frac{n_{s1}}{60} \text{ (min}^{-1}\text{)}$$

$n_{s1}$  - otáčky vzniklého magnetického pole

$n$  - otáčky rotoru synchronního stroje

Pro efektivní hodnotu indukovaného napětí jedné fáze statoru pro nezatížený stroj platí stejný vztah jako u asynchronních strojů, protože vinutí statoru je stejné. [6]

$$U_{ind} = 4,44 \cdot k_V \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot N_1 (V)$$

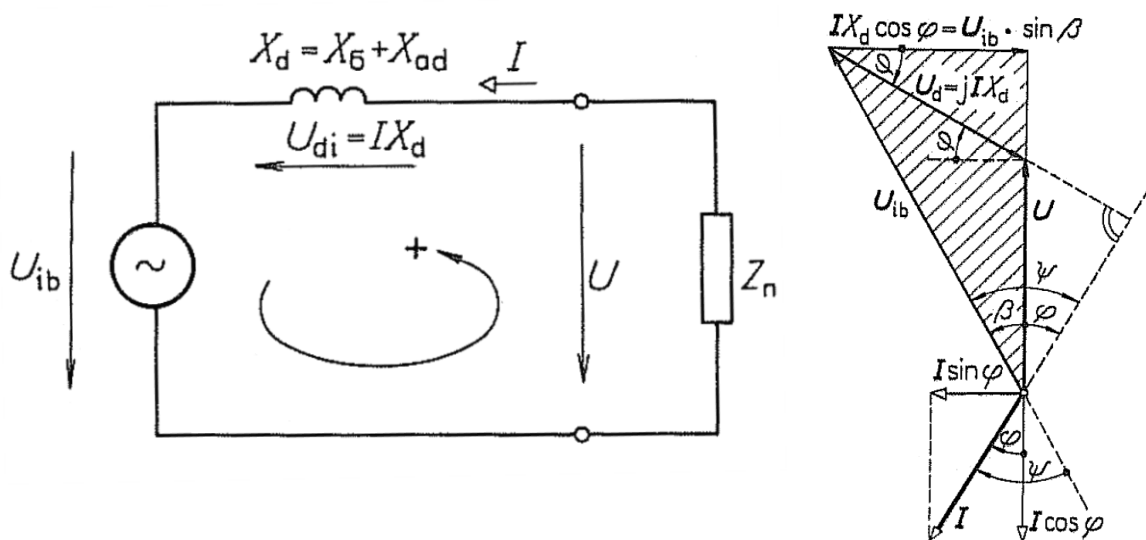
$k_V$  - činitel vinutí

$f_1$  - kmitočet

$\Phi$  - magnetický tok

$N_1$  - počet závitů

Při zatížení generátoru podle Obr. 2 je na svorkách vinutí statoru svorkové napětí  $U$ , odpor vinutí statoru se může zanedbat, protože většinou platí, že je mnohem menší než reaktance  $X_d$ . Budicí obvod na rotoru stroje není v náhradním schématu uvažován, protože je napájen ze zdroje stejnosměrného napětí a je nezávislý na obvodu statoru. Úhel  $\beta$  ve fázorovém diagramu je úhel mezi indukovaným napětím naprázdno  $U_{ib}$  a svorkovým napětím stroje  $U$  a je to tzv. zátěžný úhel, který určuje velikost zatížení stroje. V případě generátoru, který není zatížen je úhel  $\beta = 0^\circ$ , ale při zátěžném úhlu  $\beta = 90^\circ$  je výkon vyráběný generátorem nejvyšší. [6] [1]



Obr. 2. - Zjednodušené náhradní schéma a fázorový diagram synchronního stroje

### 2.1. Moment synchronního stroje s hladkým rotorem

Pro točivé stroje platí vztah:

$$M = 9,55 \frac{m}{n_s} U I \cos \varphi$$

U generátoru je to moment, který musí vytvářet pohonný motor pro vytvoření elektrického výkonu  $U I \cos \varphi$ , u motoru je to moment, který se po odečtení mechanických ztrát získá na jeho hřídeli. Závislost momentu na úhlu  $\beta$  lze vyjádřit pomocí zjednodušeného fázorového diagramu na Obr. 2, jemuž odpovídá i zjednodušené náhradní schéma. [1]

Z diagramu vychází:

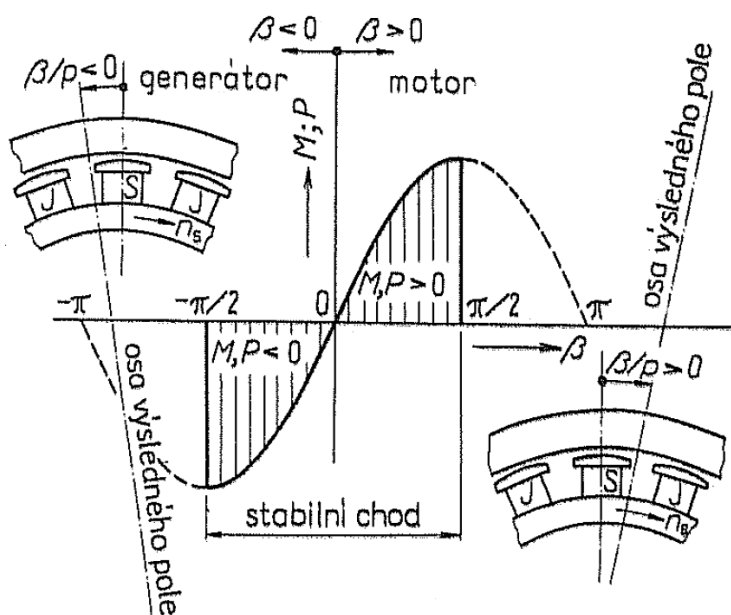
$$X_d I \cos \varphi = U_{ib} \sin \beta$$

$$I \cos \varphi = \frac{U_{ib}}{X_d} \sin \beta$$

Takže po dosazení dostáváme vztah:

$$M = 9,55 \frac{m}{n_s} U \frac{U_{ib}}{X_d} \sin \beta$$

Při stálém buzení  $U_{ib}$  a při stálém napětí, moment závisí na  $\sin \beta$ . Stejně se mění i výkon. Obr. 3. Chodu naprázdno  $\beta=0$  odpovídá nulový moment. U generátoru předbíhá magnetové kolo osu výsledného magnetického toku ve stroji, takže úhel  $\beta$  a tedy i moment, je záporný. U motoru se magnetové kolo zpožďuje za výsledným magnetickým tokem, zátěžný úhel a moment je kladný. S rostoucím zátěžným úhlem se moment motoru i generátoru zvětšuje až na maximální moment  $M_{\max}$ , odpovídají úhlu  $\beta=\pi/2$ . [1]



Obr. 3. - Moment synchronního stroje s hladkým rotorem

## 2.2. Moment synchronního stroje s vyjádřenými póly

Odvození momentu je složitější, neboť vliv reakce a rozptylu nemůžeme u stroje s vyjádřenými póly nahradit jedinou reaktancí. Magnetický odpor obvodu reakčního magnetického toku je v podélné i příčné ose různý a proto se musí rozlišovat. [1]

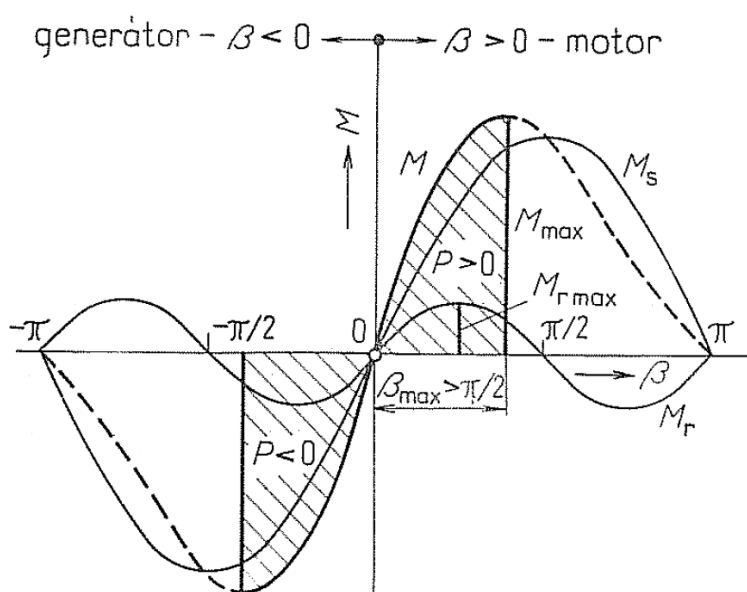
Přitom předpokládáme, že rozptylová reaktance je v každém směru stálá. Moment stroje s vyjádřenými póly je tedy dán vztahem:

$$M = 9,55 \frac{m}{n_s} U \frac{U_{ib}}{X_d} \sin \beta + 9,55 \frac{m}{n_s} U^2 \frac{X_d - X_q}{2 \cdot X_d X_q} \sin 2\beta = M_s + M_r$$

Synchronní moment  $M_s$  – je stejný jako u stroje s hladkým rotorem a závisí na buzení a na  $\sin \psi$

Reakční moment  $M_r$  – se mění v závislosti na  $\sin 2\omega t$ , jehož velikost závisí na rozdílu podélné a příčné reaktance a vůbec nezávisí na buzení.

Moment zvratu je větší než u stroje s hladkým rotorem, ale nastane při úhlu  $\beta < \pi/2$ . Působením reakčního momentu by se roztočený motor udržel v chodu i při vypnutém buzení, pokud by jeho zatížení nepřestoupilo moment  $M_{r \max}$  a zátěžný úhel velikosti  $\pi/4$ . [1]



Obr. 4. - Moment synchronního stroje s vyjádřeními póly v závislosti na zátěžném úhlu

### 3. Spouštění synchronního motoru

#### 3.1. Asynchronní rozběh

Při použití asynchronního rozběhu se na rotoru použitého motoru nachází rozběhové vinutí, budící vinutí při tomto rozběhu je spojeno přes ochranný odpor, tento způsob umožňuje synchronnímu motoru se rozběhnout jako asynchronní motor nakrátko. Když motor dosáhne otáček blízkých jmenovitých, motor se nabudí a vtáhne se do synchronismu. [4]

#### 3.2. Rozběh pomocným motorem

Při použití rozběhu pomocným motorem se používá budič, který se nachází na hřídeli motoru, nebo se použije asynchronní motor, takovéto typy rozběhu se ale pomalu přestávají využívat. [4]

### 3.3. Řízený rozběh

Při použití řízeného rozběhu se hojně využívá frekvenčních měničů s PWM- pulzní šířkovou modulací, tyto měniče vyrobí napětí, které je v podstatě řada pulzů s proměnnou šířkou. Tyto nepřímé měniče se využívají v průmyslových aplikacích. Dalším typem jsou přímé měniče, které nemění frekvenci podle stanoveného vzoru, ale podle toho kdy je potřeba změnit moment, využívají se pro motory velkých výkonů.

## 4. Zkrat synchronního stroje

Tato zkouška se provádí při jmenovitých otáčkách, neměli bychom tuto zkoušku zaměňovat se zkouškou nakrátko, při níž při zkratových zkouškách opatrně zvyšujeme buzení stroje až do hodnoty  $I_k = I_l$ . Musíme dbát na to, aby všechny fáze byly sepnuty ve stejném okamžiku, jinak bychom tímto způsobem vnášeli chybu do snímajícího se průběhu, je doporučeno použít kvalitní stykače, které tento problém omezí na minimum. [8]

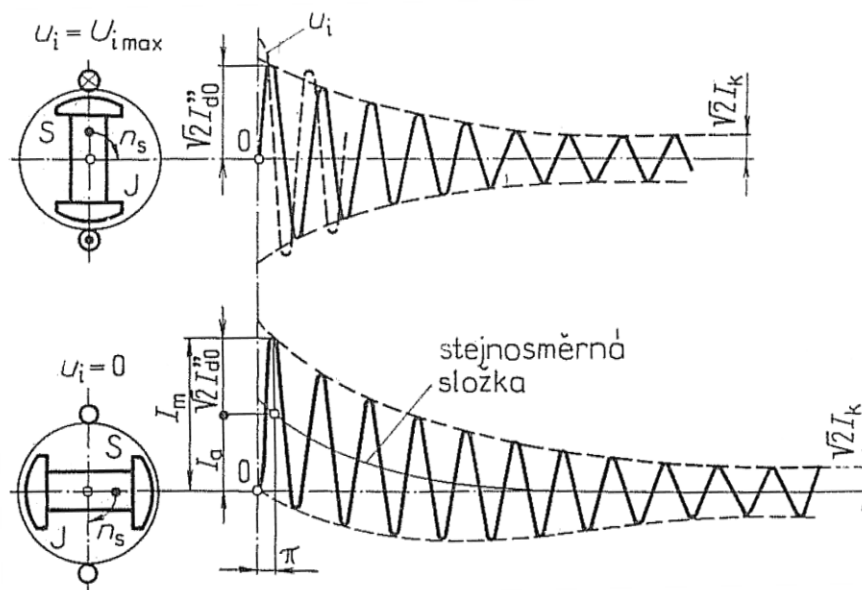
V okamžiku zkratu vzniknou proudy, které mnohonásobně převýší jmenovité hodnoty. Tyto proudy vznikají jak ve vinutí statoru, tak i v rotorovém vinutí. Tyto proudy vyvolávají značné ztráty a oteplují stroj, ale také svými dynamickými účinky neúměrně namáhají vinutí, ale i jiné konstrukční části stroje. Pro velikost zkratových proudů je rozhodující jaký druh zkratu nastane.

V případě zkratu mohou nastat tyto případy:

- 1) souměrný trojfázový zkrat - současně se spojí všechny tři fáze
- 2) jednofázový zkrat – spojení fáze se zemí
- 3) dvoufázový zkrat – spojení dvou fází, tento stav je méně příznivý
- 4) zemní zkrat – je to stav kdy vinutí jedné fáze nebo více fází je zkratováno na zem
- 5) zkrat budícího vinutí na kostru
- 6) závitový zkrat vinutí statoru nebo buzení.

První náraz zkratového proudu má pro každou fázi jiný průběh a závisí, ve kterém okamžiku nastal. Časový interval od vzniku zkratu až do okamžiku, ve kterém se dosáhne ustáleného zkratového proudu, který obvykle nepřesáhne  $2 \cdot I_{ln}$ , je doba trvání elektromagnetického přechodného děje. Na Obr. 5 je zkrat, který nastal ve chvíli, kdy se ve vinutí uvažované fáze indukuje max. napětí. Celkový magnetický tok, spřažený s vinutím fáze, je nulový. Indukční zkratový proud musí tedy začínat v nule. [1]





Obr. 5. – Průběh zkratového proudu generátoru

Nejnepříznivější případ nastane tehdy, když ke zkratu dojde ve chvíli, kdy je vinutí uvažované fáze spřaženo s plným magnetickým tokem a indukované napětí je nulové. [1]

## 5. Rozsah zkoušek

Zkoušky provádíme abychom podali důkaz o tom zda testovaný stroj vyhovuje platným normám, tudíž se stroj kontroluje jak po stránce elektrické tak i mechanické. V případě že zkoušky vycházející z normy nestačí pro koncového odběratele, může se s výrobcem dohodnout na specifických zkouškách pro konkrétní zařízení. Všechny mechanické zkoušky určuje norma ČSN 35 0010 a norma ČSN 35 0000 předepisuje rozsah kontrolní a kusové zkoušky, pro asynchronní, synchronní a stejnosměrné stroje.

### 5.1. Typová zkouška

Je to záznam o zkoušce, které jsou v příslušné normě označeny jako typové. Zkoušky ověřují všechny příslušné předepsané parametry, které se vztahují k prováděné zkoušce v jejich jmenovitých hodnotách udaných výrobcem.

Při této zkoušce se určuje, zda zkoušený stroj vyhovuje předepsané normě, popřípadě jestli vyhovuje předem sjednané zkoušce na které se domluvil výrobce s odběratelem. Takovéto typové zkoušky se provádí na každém novém stroji.

Z této typové zkoušky bývá zpracován zkušební protokol, který se uchovává nejméně 10 let.

Typová zkouška se opakuje v případech:

- 1) U strojů, které byly vyrobeny jednotlivě, se musí zkouška opakovat max. do 10 roků od původní zkoušky.
- 2) U strojů, které byly vyrobeny hromadně, se musí zkouška opakovat max. do 5 roků od původní zkoušky, nebo po předem stanoveném počtu kusů. Nebo pokud se výroba daného zařízení převedla na jiný závod.
- 3) Pokud by se během výroby přešlo na jiné technologické postupy jako je konstrukce, materiál, které by mohly mít podstatný vliv na vlastnost daného zařízení.
- 4) Pokud se při kontrolních zkouškách na zařízeních vyráběných v sériích vyskytují opakovaně odchylky.

#### 5.1.1. Dílčí normy pro typovou zkoušku [3]

Název zkoušky	Zkoušeno dle normy
Základní mechanické zkoušky	ČSN 35 0010
Měření izolačního odporu	ČSN 35 0010 <sup>*)</sup>
Měření činného odporu za studena	ČSN 35 0010, ČSN EN 60034-4
Zkouška závitové izolace	<sup>*)</sup>
Zkouška vinutím přiloženým napětím	ČSN 35 0010 <sup>*)</sup>
Oteplovací zkouška	ČSN 35 0010 <sup>*)</sup>
Zkouška mechanické odolnosti <sup>1)</sup>	ČSN 35 0010
Měření kmitání	ČSN 35 0000-14
Měření hluku <sup>3)</sup>	ČSN EN 21680-1, ČSN EN 21680-2
Měření množství chladiva	ČSN 35 0019-06
Zkouška krytí	ČSN EN 60034-5
Zkouška odrušení	ČSN EN 55011, ČSN EN 55014
Měření charakteristiky naprázdno	ČSN 35 0010, ČSN EN 60034-4
Měření charakteristik nakrátko <sup>5)</sup>	ČSN 35 0010, ČSN EN 60034-4
Kontrola izolace proti hřídelovým proudům <sup>1)</sup>	ČSN EN 60034-4 <sup>*)</sup>
Kontrola sledu fází	ČSN 35 0010 <sup>*)</sup>
Určení buzení při zatížení a kontrola jmenovitého přírůstku napětí	ČSN EN 60034-4
Měření rozptylové Potierovy reaktance <sup>1)</sup>	ČSN EN 60034-4
Kontrola tvaru křivky napětí	ČSN 35 0010 <sup>*)</sup>
Měření ztrát a určení účinnosti <sup>5)</sup>	ČSN 35 0015 <sup>*)</sup>
Zkouška přetížitelnosti <sup>1)</sup>	ČSN 35 0010
Zkratová odolnost a zkratový proud	ČSN EN 60034-4
Měření reaktancí, časových konstant a dalších veličin ze zkoušek	ČSN EN 60034-4
Měření spouštěcích charakteristik stroje s asynchronním spouštěním	ČSN 35 0010
Stanovení momentu setrvačnosti rotoru	ČSN 35 0019-08
Měření polarizačního indexu	ČSN 35 0010 <sup>*)</sup>
Měření ztrátového činitele	<sup>*)</sup>

Tab. 1. - Výčet norem pro typovou zkoušku

<sup>\*)</sup> zkouší se podle příslušné specifikace

- 1) pro tuto zkoušku je třeba dalšího ujednání jak o způsobu provedení, tak o účasti odběratele
- 2) neprovádí se u strojů sériové výroby

- 3) u turbogenerátorů jsou naměřené hodnoty pouze informativní
- 4) u strojů sériové výroby se měří jen jeden kontrolní bod při 130 % UN
- 5) při této zkoušce je nutno dále dohodnout způsob provedení zkoušky [3]

## 5.2. Kontrolní kusová zkouška

Touto zkouškou výrobce kontroluje, zda má každý stroj vlastnosti shodné se schváleným typem. Výsledky z těchto zkoušek se uschovávají nejméně 5 let. Tyto záznamy taktéž mohou sloužit pro sledování průběhu jakosti výroby.

### 5.2.1. Dílčí normy pro kusovou zkoušku [3]

Název zkoušky	Zkoušeno dle normy
Základní mechanické zkoušky	ČSN 35 0010
Měření izolačního odporu	ČSN 35 0010 *)
Měření činného odporu za studena	ČSN 35 0010, ČSN EN 60034-4
Zkouška závitové izolace	*)
Zkouška vinutím přiloženým napětím	ČSN 35 0010 *)
Zkouška mechanické odolnosti <sup>1)</sup>	ČSN 35 0010
Měření kmitání <sup>2)</sup>	ČSN 35 0000-14
Zkouška krytí <sup>2)</sup>	ČSN EN 60034-5
Měření charakteristiky naprázdno <sup>4)</sup>	ČSN 35 0010, ČSN EN 60034-4
Kontrola izolace proti hřídelovým proudům <sup>1)</sup>	ČSN EN 60034-4 *)
Kontrola sledu fází	ČSN 35 0010 *)
Určení buzení při zatížení a kontrola jmenovitého přírůstku napětí	ČSN EN 60034-4
Měření rozptylové Potierovy reaktance <sup>1) 2)</sup>	ČSN EN 60034-4
Měření ztrát a určení účinnosti <sup>5) 2)</sup>	ČSN 35 0015 *)
Měření polarizačního indexu	ČSN 35 0010 *)

Tab. 2. - Výčet norem pro kusovou zkoušku

\*) zkouší se podle příslušné specifikace

- 1) pro tuto zkoušku je třeba dalšího ujednání jak o způsobu provedení, tak o účasti odběratele
- 2) neprovádí se u strojů sériové výroby
- 3) u turbogenerátorů jsou naměřené hodnoty pouze informativní
- 4) u strojů sériové výroby se měří jen jeden kontrolní bod při 130 % U<sub>N</sub>
- 5) při této zkoušce je nutno dále dohodnout způsob provedení zkoušky [3]

## 5.3. Přejímací zkouška

Přejímací zkouška se provádí tehdy, byla-li písemně sjednána mezi odběratelem a výrobcem, a to tam, kde to stanoví dohoda. Přejímací zkouška odpovídá obvykle svým rozsahem kontrolní kusové zkoušce a bývá spojena s všeobecnou prohlídkou a kontrolou úplnosti dodávky. [3]

## 5.4. Základní mechanická zkouška

Mechanická zkouška se provádí jak kusové tak u typové zkoušky, vizuální kontrolou zjišťujeme, jestli se na stroji nevyskytují závady přímo ohrožující chod, dále by se mělo

zkontrolovat příslušenství stroje, uchycení prvků na stroji a ve svorkovnici, které jsou nutné pro správný chod. Z důvodu odhalení závad by se zkoušený stroj měl roztáčet velice pomalu, než dosáhne jmenovitých otáček.

### 5.5. Měření izolačního odporu

Tato zkouška se provádí jak u kusové tak u typové zkoušky. Zdánlivý izolační odpor ( $R_{iz}$ ) je definován jako poměr konstantního stejnosměrného napětí připojeného na vybitou izolaci a proudu, který protéká izolací ve smluveném čase. Hodnota zdánlivého izolačního odporu  $R_{iz}$  je ovlivněna absorbovanou vlhkostí v izolaci, znečištěním stroje, produkty degradace a také konstrukcí stroje. Velikost zdánlivého izolačního odporu ovlivňuje též teplota měřeného stroje. Hodnota zdánlivého izolačního odporu  $R_{iz}$  se udává v MΩ. Izolační odpor části vinutí nebo vinutí jako celku musí mít dle ČSN 35 0000 vzájemně mezi sebou (např. mezi fázemi) a také proti kostře hodnotu definovanou vztahem: [10]

$$R_{iz} = \frac{U_N}{\frac{S_N}{100} + 1000}$$

$R_{iz}$  – izolační odpor [M Ω]

$U_N$  – jmenovité napětí [V]

$S_N$  – jmenovitý zdánlivý výkon [kVA]

$P_N$  – jmenovitý výkon [kW]

Tento vztah platí pro provozní teplotu vinutí. Při teplotě vinutí 20° C, má být odpor pětinasobný. Jedná se o obecný vztah, který nerespektuje velikost stroje, teplotu, druh a třídu izolace. Norma ČSN 35 0010 umožňuje při kusové zkoušce měřit  $R_{iz}$  pouze za studena. [10]

### 5.6. Měření činného odporu za studena

Tato zkouška je předepsaná normou při typových i kusových zkouškách. Zároveň s měřením odporu vinutí musíme měřit teplotu vinutí, poněvadž odpor vinutí se mění s teplotou. Teplotu vinutí můžeme považovat za teplotu okolí pouze u zcela vychladlého stroje např. po dlouhé odstávce. Naměřené hodnoty přepočítáváme na teplotu 20°C. Teplotu okolí můžeme předpokládat jako teplotu vinutí jen tehdy, když měříme na úplně vychladnutém stroji, za předpokladu, že teplota okolí v průběhu dne příliš nekolísá. [10]

$$R_{20} = R_{\vartheta} \cdot \frac{\tau + 20}{\tau + \vartheta}$$

$R_{20}$  - odpor vinutí při 20°C [Ω]

$R_{\vartheta}$  - odpor vinutí při teplotě  $\vartheta$  [Ω]

$\vartheta$  - teplota vinutí [°C]

$\tau$  – je pro Cu 235 a pro Al 230

### 5.7. Zkouška závitové izolace

Zkouška závitové izolace se vyskytuje jak u kusové tak u typové zkoušky. Definice této zkoušky je, že na dobu 3minut se svorkové napětí stroje zvýší na  $1,3U_N$ , tudíž ji u typové zkoušky můžeme měřit současně s měřením naprázdno. U zkoušky kusové není měřena charakteristika naprázdno, tudíž se musí tato zkouška změřit zvlášť. Po dobu této zkoušky by nemělo dojít k žádnému poškození daného zařízení.

### 5.8. Zkouška vinutí přiloženým napětím

Impulsní srovnávací zkoušku provádíme jak u kusové tak u typové zkoušky. Podle normy ČSN 350010 se tato zkouška má provádět ihned po oteplovací zkoušce. V případě kusové zkoušky se může provádět ve studeném stavu. Před provedením této zkoušky se musíme přesvědčit, zdali je v pořádku izolační stav vinutí.

Jedná se o nezatežovací, srovnávací zkoušku (porovnávají se vždy dva současné snímané průběhy). Pokud je jedna z částí stroje poškozena proti zemi nebo má-li poruchu typu mezizávitového nebo mezifázového zkratu, pak je jedna z těchto křivek odlišná od druhé. Zkratové nebo chybějící závity způsobí znatelné rozdíly v amplitudě snímaného průběhu a poruchy jako např. chybná zapojení vinutí způsobí hrubou změnu magnetického pole, což způsobí velké nepravidelnosti ve snímaných průbězích. [10]

Zkušební napětí, které se připojuje na satorové vinutí, se určuje ze vztahu:

$$U_{zk} = 2 \cdot U_N + 1000$$

### 5.9. Oteplovací zkouška

Podle normy ČSN 35 0010 provádíme toto měření jen u typové zkoušky, podle druhu zatížení zkoušíme, jestli teplota nepřekročí dovolenou hodnotu pro třídu teplotní izolace.

Pro určení celkového oteplení máme na výběr tyto metody: odporovou metodou, čidla umístěná ve stroji a teploměrovou metodu kde teploměry přikládáme na vhodná místa na stroji.

Pro výpočet oteplení můžeme použít následující vztah:

$$\theta_2 - \theta_x = \frac{R_2 - R_1}{R_2} \cdot (k + \theta_1) + \theta_1 - \theta_x$$

$\theta_1$  - teplota vinutí na začátku měření

$\theta_2$  - teplota vinutí na konci měření

$\theta_x$  - teplota chladiva na konci zkoušky

$R_1$  - odpor vinutí při teplotě stejné jako  $\theta_1$

$R_2$  - odpor vinutí na konci zkoušky

$k$  - převrácená hodnota teplotního součinitele

Pro měď  $k = 235$

Pro hliník  $k = 225$

### 5.10. Určení reaktancí $X'_d$ , $X''_d$ a časových konstant

Při určování přechodné a rázové reaktance se měřený stroj nemusí plně nabudit, ale stačí, když se nabudí na  $(0,2-0,3)U_N$ . Pokud bychom chtěli ověřit mechanickou stabilitu, tak stroj roztočíme na jmenovité otáčky a nabudíme na  $1,05U_N$  poté statorové vinutí všech fází spojíme nakrátko, dojde k 3-fázovému zkratu. Při takovémto zkratu vznikne rázový zkratový proud, který by podle normy ČSN EN 60034-4 neměl být větší než 21x efektivní hodnoty jmenovitého proudu, takovéto zkoušky ale mají s největší pravděpodobností pro statorové vinutí negativní dopad, i když jsou konstruovány tak aby takovou zátěž krátkodobě zvládali, může dojít i ke zničení zkoušeného stroje. Pro výpočet parametrů použijeme následující vztahy: [5]

$$\text{Jmenovitá impedance: } Z_N = \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3}}}{I_N} [\Omega]$$

$$\text{Synchronní reaktance } X_d = X_1 = \frac{U_{3k}}{I_{1fN}} [\Omega] \Rightarrow x_d = x_1 = \frac{X_d}{Z_N}$$

$$\text{Nulová reaktance } X_0 = \frac{3 \cdot U_{1k} - \sqrt{3} \cdot U_{2k}}{I_{1fN}} [\Omega] \Rightarrow x_0 = \frac{X_0}{Z_N}$$

$$\text{Přechodná reaktance } X'_d = \frac{U_{1fN}}{I_{k3} + I'_{k0}} [\Omega] \Rightarrow x'_d = \frac{X'_d}{Z_N}$$

$$\text{Rázová reaktance } X''_d = \frac{U_{1fN}}{I_{k3} + I'_{k0} + I''_{k0}} [\Omega] \Rightarrow x''_d = \frac{X''_d}{Z_N}$$

### 5.11. Měření polarizačního indexu

Jedním z hlavních parametrů používaných pro hodnocení stavu izolace je kromě vlastního izolačního odporu takzvaný polarizační index. Tento diagnostický test je založen na faktu, že dobrá izolace se po přiložení měřicího napětí projevuje růstem izolačního odporu v čase. Při

testu polarizačního indexu se měří izolační odpor ve dvou po sobě jdoucích časových intervalech, obvykle po jedné minutě od okamžiku přiložení měřicího napětí a po deseti minutách. Polarizační index je dán podílem obou změřených izolačních odporů. Se vzrůstající teplotou a obsahem vlhkosti se polarizační index zmenšuje. Měřicí stejnosměrné napětí 1 kV až 5 kV se přiloží na vstup fáze, ostatní fáze se na vstupu uzemní. Druhý konec každé fáze zůstane nezapojen. Měření se provede ve všech třech fázích samostatně. [9] [10]

$$p_{i10} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}}$$

R60 – izolační odpor po 60s [MΩ]

R600 – izolační odpor po 600s [MΩ]

## 6. Měření charakteristik

### 6.1. Měření naprázdno

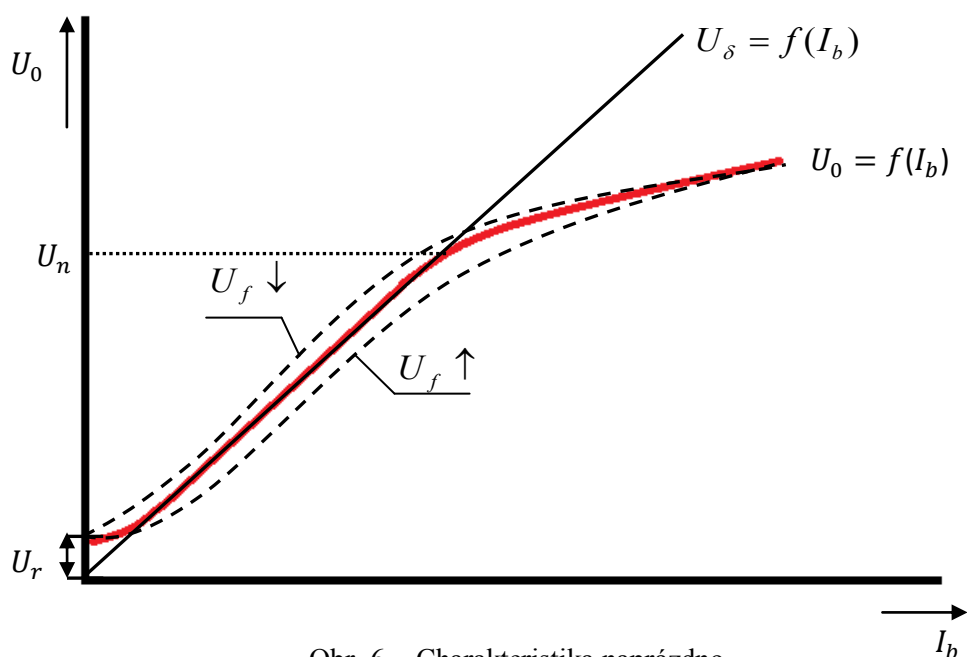
Zkouška naprázdno je zkouška, při níž zkoušený stroj, nedává na hřídeli žádný mechanický výkon. Měření naprázdno zjišťujeme jednak vlastnosti magnetického obvodu měřeného stroje, který vyjadřuje magnetizační charakteristika a také ztráty při chodu naprázdno v závislosti na napětí. Zároveň je možno provádět další zkoušky např: určení tvaru křivky napětí, určení vlnitosti napětí, zkoušku izolace závitů zvýšeným napětím, kontrolu mechanického chodu stroje.

Měření naprázdno se provádí na nezátíženém elektrickém stroji buď při chodu stroje jako generátor nebo jako motor. V prvním případě se rovná nule elektrický, v druhém mechanický výkon zkoušeného stroje. U strojů, které mají vlastní budicí obvod, se měří naprázdno obvykle při chodu jako generátor. V generátorovém chodu je obtížnější určení ztrát cejchovaným motorem nebo elektrickým dynamometrem. Měří se při stálých otáčkách.

K pohonu zkoušeného stroje v generátorovém chodu stačí motor s výkonem rovnajícím se ztrátám naprázdno při zvýšeném napětí, u malých středních strojů lze s výhodou použít k pohonu elektrického dynamometru, kterým zároveň měříme i ztráty. Dobře se hodí stejnosměrný motor v Leonardově zapojení jako poháněcí stroj a to pro snadné řízení otáček. [2]

### 6.2. Charakteristika naprázdno

Charakteristika naprázdno určuje závislost vnitřního indukovaného napětí na budicím proudu  $U_0 = f(I_b)$ . Vnitřní indukované napětí je při stálých otáčkách stroje nebo při stálém kmitočtu sítě úměrné magnetickému toku nebo magnetické indukci stroje. Budicí proud je úměrný budicí magnetomotorické síle, respektive intenzitě magnetického pole. Bude proto charakteristika naprázdno  $U_0 = f(I_b)$  až na měřítko stejná jako závislost  $B = f(H)$  příslušného magnetizačního obvodu a její průběh bude záviset na vlastnostech použitého magnetického materiálu.



Obr. 6. - Charakteristika naprázdno

Magnetizační charakteristika má v nenasycené části inflexní bod. Je tvořena přímkovou nenasycenou a zakřivenou nasycenou částí (kolenem). Při  $I_b=0$  naměříme remanentní napětí  $U_r$ , odpovídající zbytkovému magnetismu.

Při měření charakteristiky naprázdno u stroje v chodu jako generátor poháníme stroj pomocným cejchovaným motorem nebo elektrickým dynamometrem, abychom zároveň měřili ztráty. Udržíme stálé otáčky a měníme budicí proud a tím i velikost indukovaného napětí stroje shora dolů, tj. od napětí  $U_0 = 1,2 U_n$  až  $1,3 U_n$  až do remanentního napětí.

Při měření charakteristiky naprázdno u stroje v chodu jako motor, přivádíme na svorky stroje napětí sítě proměnné velikosti od  $U_0 = 1,3 U_n$  do  $0,25 U_n$  a udržujeme stálé otáčky. U střídavých strojů odebíráme proměnné napětí stálého kmitočtu, např. z indukčního regulátoru nebo alternátoru. Proud měříme ve všech třech fázích a bereme z naměřených hodnot aritmetický střed. Napětí naměřené na svorkách všech druhů elektrických motorů je vyšší než vnitřní indukované napětí o úbytky způsobené proudem naprázdno na odporu a na rozptylové reaktanci napájeného vinutí. Tyto úbytky bývají při chodu naprázdno malé a v praxi se neuvažují. Proto se vynáší přímo závislost svorkového napětí  $U_0$  na magnetizačním proudem  $I_0$ . [2]

### 6.3. Měření nakrátko

Je to zkouška, při níž zjišťujeme rozptylové poměry stroje a měříme charakteristiku nakrátko, velikost ztrát nakrátko a u motorů na střídavý proud i velikost záběrného momentu. Z hodnot určených při měření nakrátko se stanovují další charakteristické hodnoty pro stroje v normálním provozu nebo při zkratu.



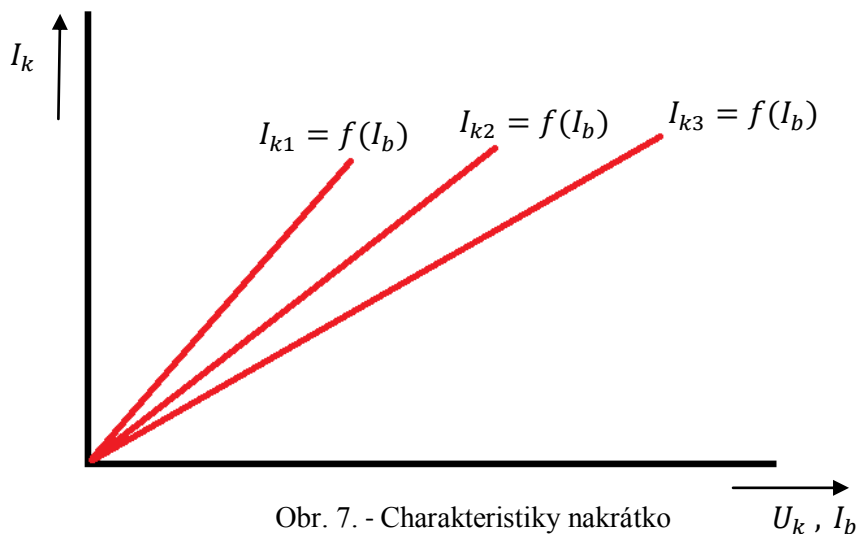
Měření nakrátko se provádí u strojů se samostatným buzením při chodu stroje a stálých otáčkách a při spojení nakrátko vinutí kotvy nebo statoru. U strojů, které nemají vlastní budicí obvod, se měří nakrátko na zabrzděném stroji nebo při velmi malých otáčkách, přičemž měřený stroj má sekundární vinutí spojené nakrátko. U synchronního motoru v provedení s vlastním rozběhem se měří nakrátko jak na zabrzděném stroji, tak při chodu stroje se jmenovitými otáčkami. Budicí proud nebo napájecí napětí zkoušeného stroje je třeba řídit tak, aby proud stroje zůstal řádově na jmenovité hodnotě proudu  $I_n$ . Měření nakrátko se provádí na teplém stroji, s výhodou zvláště po skončení oteplovací zkoušky.

Nutno rozlišovat měření nakrátko od zkratové zkoušky stroje, kterou obvykle konáme u alternátorů a transformátorů za chodu s plným napětím náhlým spojením do zkratu tak, že zkratový proud dosahuje mnohonásobku jmenovitého proudu stroje. Účelem zkratové zkoušky je kontrola mechanické pevnosti vinutí, kostry, hřídele a základové konstrukce stroje. [2]

#### 6.4. Charakteristika nakrátko

U strojů se samostatným budicím obvodem je závislost proudu nakrátko  $I_k$  stroje na budicím proudu  $I_k = f(I_b)$ . U strojů bez samostatného budicího obvodu je to závislost proudu nakrátko  $I_k$  na napájecím napětí  $I_k = f(U_k)$ . Průběh charakteristiky nakrátko je přímkový, pokud je impedance nakrátko měřeného stroje stálá. U synchronních strojů se vynáší sice charakteristika nakrátko v závislosti na budicím proudu, ale ani zde se neuplatní zakřivení charakteristiky nakrátko vlivem nelineární charakteristiky naprázdno, protože při měření nakrátko pracuje stroj s nepatrným magnetickým tokem.

Impedance nakrátko zůstává stálá jen při menších proudech stroje. Při větších proudech nastává podle tvaru zubů a jejich hlav nasycení rozptylových cest. Projevuje se to u strojů více sycených s polozavřenými a zavřenými drážkami, hlavně u asynchronních motorů s klecovou kotvou. Potom se sycením zmenšuje impedance nakrátko a stoupání charakteristiky je proti lineárnímu průběhu strmější. [2]



Obr. 7. - Charakteristiky nakrátko

## 7. Měření na synchronních generátorech

Měření proběhlo v laboratoři elektrických strojů E223 na synchronních generátorech s těmito parametry:

### 1. Synchronní generátor 3 ~


Výkon  $P = 12,8 \text{ kW}$        $S = 16 \text{ kVA}$       Tvar IM1001

Stator zapojen do Y     $U_n = 400 \text{ V}$      $I_n = 23 \text{ A}$     Typ A180M04

Buzení  $U_b = 3 - 12 \text{ V}$        $I_b = 1 - 2,6 \text{ A}$       Číslo 600668

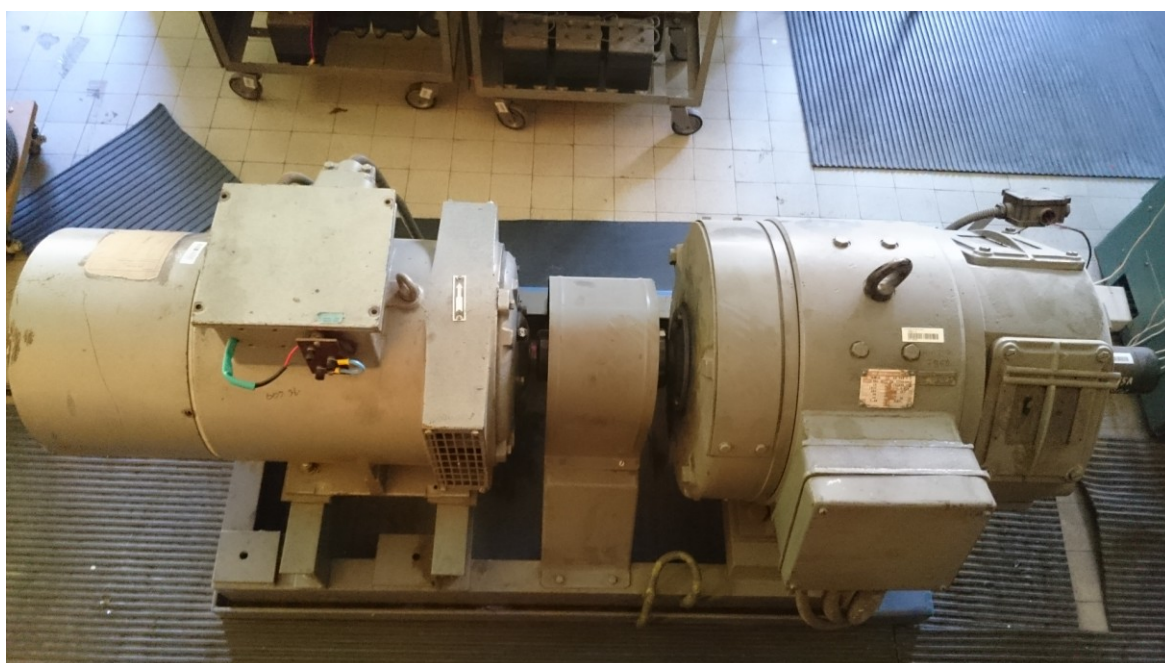
Otáčky  $1500 \text{ min}^{-1}$        $50 \text{ Hz}$        $\cos \varphi = 0,8$

Teplota  $T_{23/40}^\circ \text{C}$       ČSN 350200

		ZSE	PRAHA
		MEZ FRENŠTÁT	
		CZECHOSLOVAKIA	
SYNCHR. GEN 3 ~		TYP A180M04 02T	
IP21	IM1001	No	0600668
12.8 kW	16 kVA	S1	
50 Hz	$\cos \varphi 0.8$	1500 / min	
Y	400 V	23 A	
F1 - F2	3 - 12 V	1 - 2.6 A	
	IZOL	B	175 kg
		ČSN 350200	

Obr. 8. - Štítek 1. Synchronního generátoru

Fotografie 1. Synchronního generátoru, na kterém byla provedena příslušná měření




Obr. 9. - 1. Synchronní generátor- stejnosměrné soustrojí

Byla provedena tato měření:

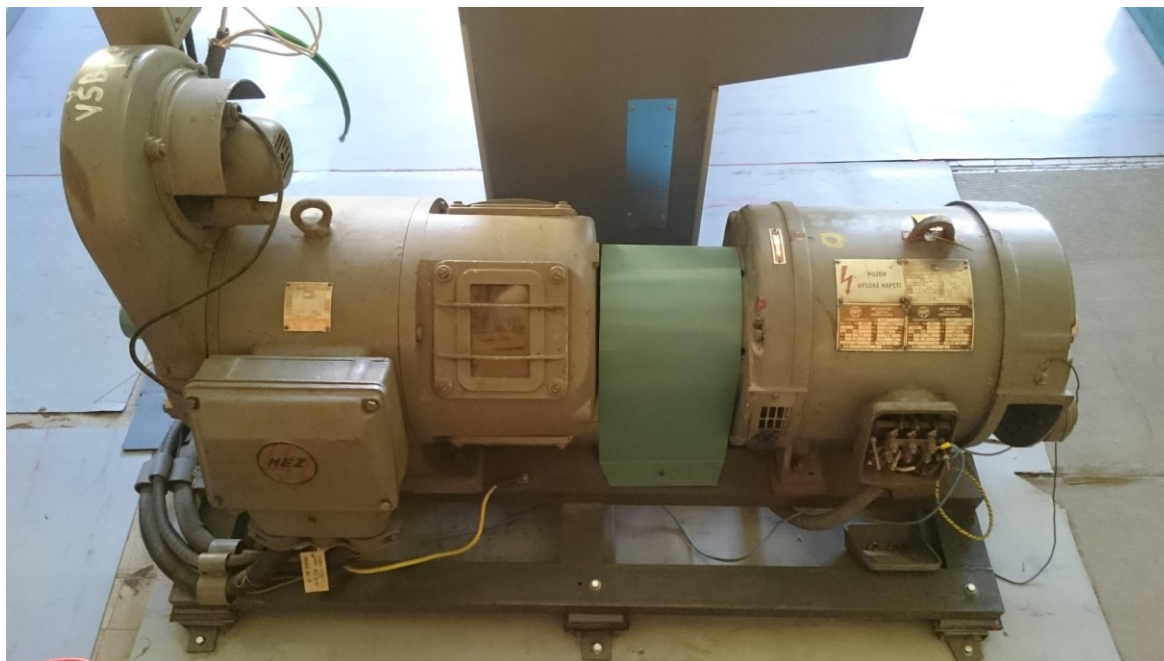
1. Měření naprázdno
2. Měření nakrátko
3. Měření podélné a příčné reaktance skluzovou metodou
4. Měření nulových složek
5. Měření reaktancí a časových konstant metodou náhlého zkratu
6. Měření průběhu V-křivek
7. Měření oteplení

**2. Synchronní generátor 3 ~**Výkon  $P = 3\text{ kW}$        $S = 10\text{ kVA}$       Tvar M101Stator zapojen do Y       $U_n = 400\text{ V}$      $I_n = 14,5\text{ A}$     Typ A8b6Buzení  $U_b = 14\text{--}56\text{ V}$      $I_b = 3,4\text{--}9,3\text{ A}$       Číslo 549024Otáčky  $1000\text{ min}^{-1}$        $50\text{ Hz}$      $\cos\varphi = 0,3$     ČSN 350200

		<b>Frenštát p.R</b>	
		<b>MEZ FRENŠTÁT</b>	
		<b>CZECHOSLOVAKIA</b>	
<b>SYNCHR.</b>	<b>GEN 3 ~</b>	<b>TYP A8b6</b>	<b>02</b>
<b>IP21/b</b>	<b>M101</b>	<b>No</b>	<b>549024</b>
<b>3 kW</b>	<b>10 kVA</b>		
<b>50 Hz</b>	<b>cosφ 0.3</b>	<b>1000 / min</b>	
<b>Y</b>	<b>400 V</b>	<b>14,5 A</b>	
	<b>14 - 56 V</b>	<b>3,4 - 9,3 A</b>	
	<b>IZOL</b>	<b>A/B</b>	<b>172 kg</b>
		<b>ČSN 350200</b>	

Obr. 10. - Štítek 2. Synchronního generátoru

Fotografie 2. Synchronního generátoru, na kterém byla provedena příslušná měření



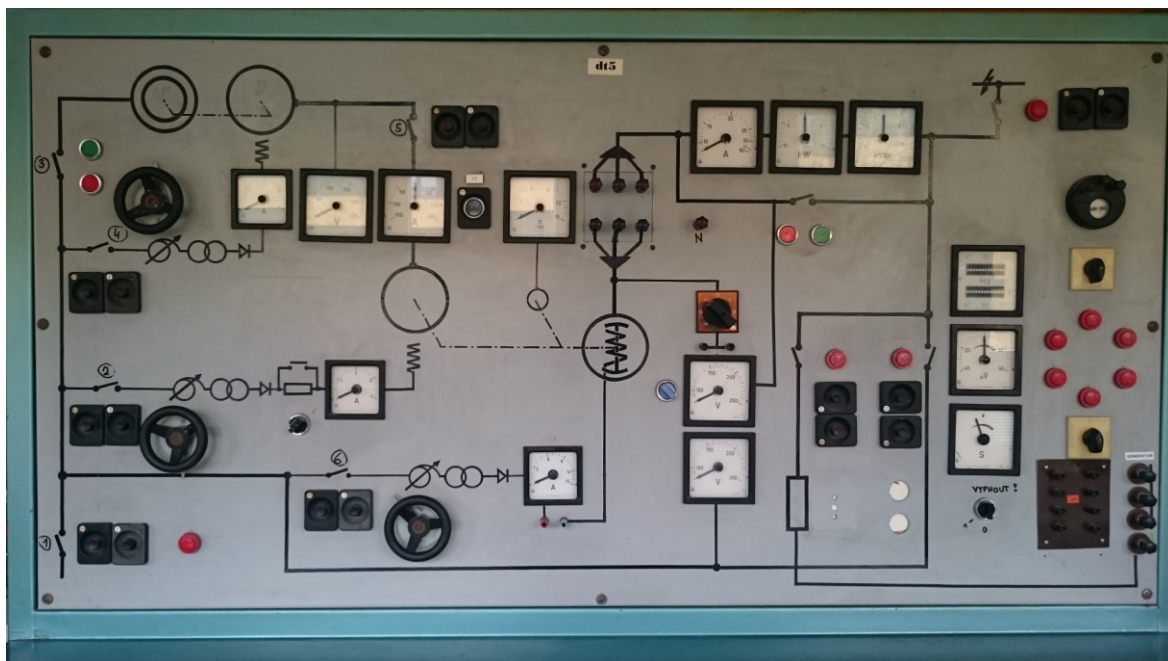
Obr. 11. - 2. Synchronní generátor- střídavé soustrojí

Byla provedena tato měření:

1. Měření naprázdno
2. Měření nakrátko
3. Měření podélné a příčné reaktance skluzovou metodou
4. Měření nulových složek
5. Měření reaktancí a časových konstant metodou náhlého zkratu
6. Měření oteplení



Fotografie měřicího pultu pro 1.SG na kterém byla provedena měření.

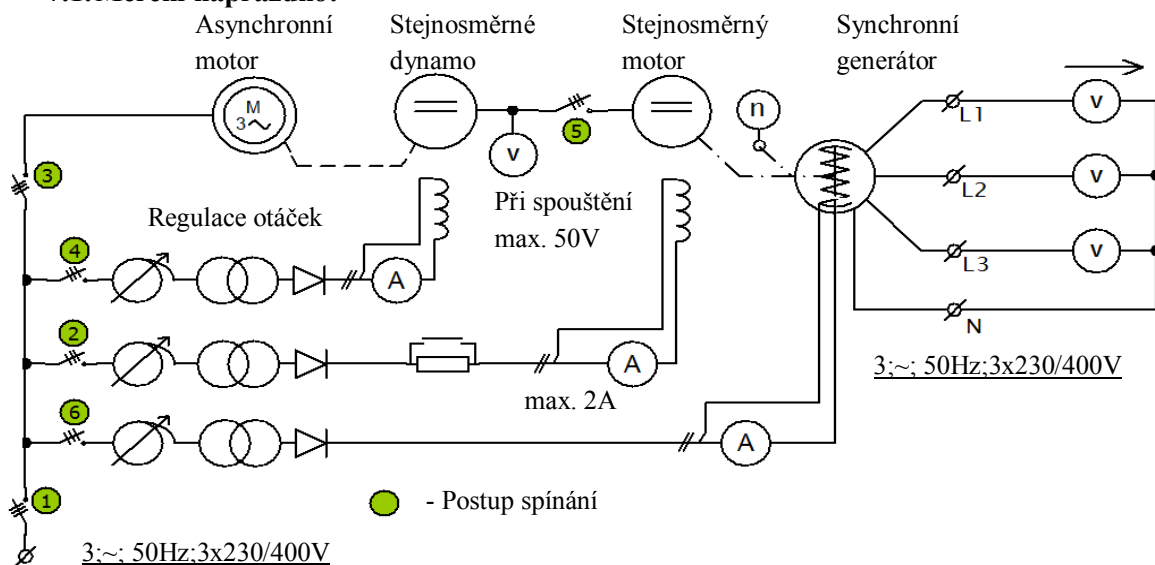


Obr. 12. - Měřicí pult pro 1.SG

Fotografie měřicího pultu pro 2.SG na kterém byla provedena měření.



Obr. 13. - Měřicí pult pro 2.SG

**7.1. Měření naprázdno:**

Obr. 14. - Schéma zapojení pro měření charakteristiky naprázdno

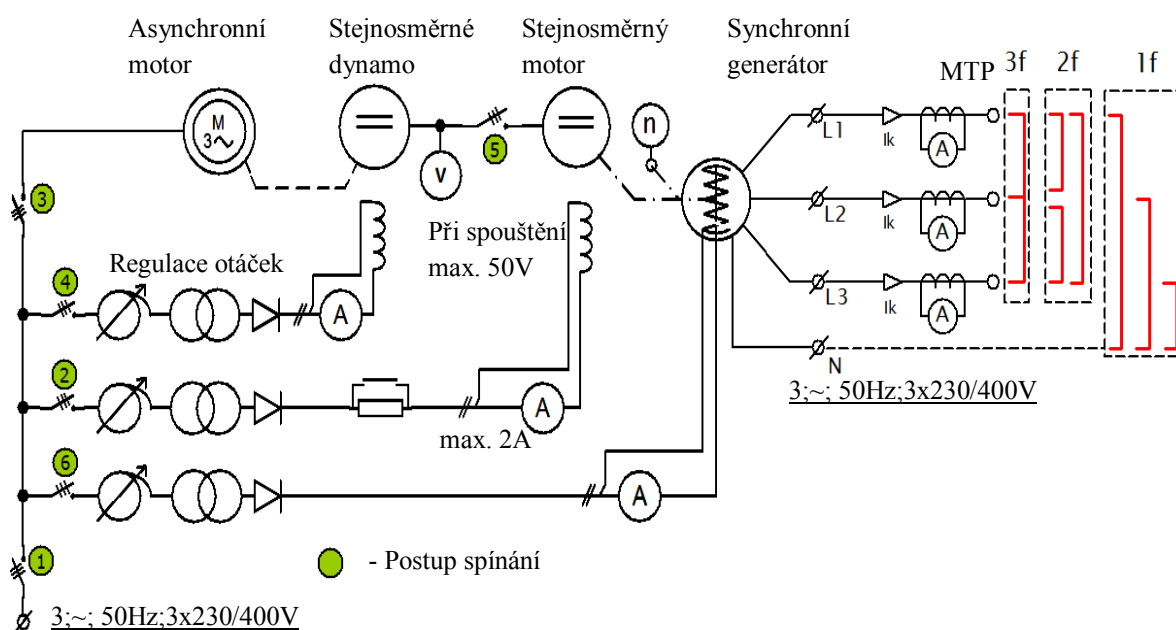
**Postup měření:**

Vše nastavíme a pospojujeme podle schématu na Obr. 14, dbáme na správné sepnutí stykačů ve správném pořadí a nastavení max. hodnot pro daná zařízení. Měřením naprázdno synchronního stroje zjišťujeme závislost satorového napětí na budícím proudu  $U_0 = f(I_b)$  při konstantních otáčkách (zpravidla synchronních). Pomocí asynchronního motoru roztočíme měřený synchronní generátor a snažíme se nastavit nominální otáčky, které jsou pro každý měřený stroj jiné. V našem případě pro 1.SG 1500ot/min a pro 2.SG 1000ot/min, otáčky kontrolujeme otáčkoměrem.

Při měření se snažíme dosáhnout max. 1,3x satorového napětí  $U_N = 230V$ , které regulujeme budícím proudem  $I_b$ . Po dosažení této hodnoty můžeme generátor v tomto stavu ponechat po dobu 3minut a podle normy ČSN 35 0000 tak odzkoušíme i závitovou izolaci.

Od této hodnoty, v našem případě 305V je snižován proud  $I_b$  až na nulu. Při regulaci se podrobně proměří oblast v okolí  $U_n$  (malé změny  $I_b$ ). Při snižování budícího proudu se doporučuje nastavit stejné hodnoty jako při zvyšování a napětí odečítat ze všech třech fází.

Z naměřených hodnot viz příloha A, E jsou zkonstruovány charakteristiky naprázdno  $U_0 = f(I_b)$  viz příloha D, H.

**7.2. Měření nakrátko:**

Obr. 15. - Schéma zapojení pro měření charakteristiky nakrátko

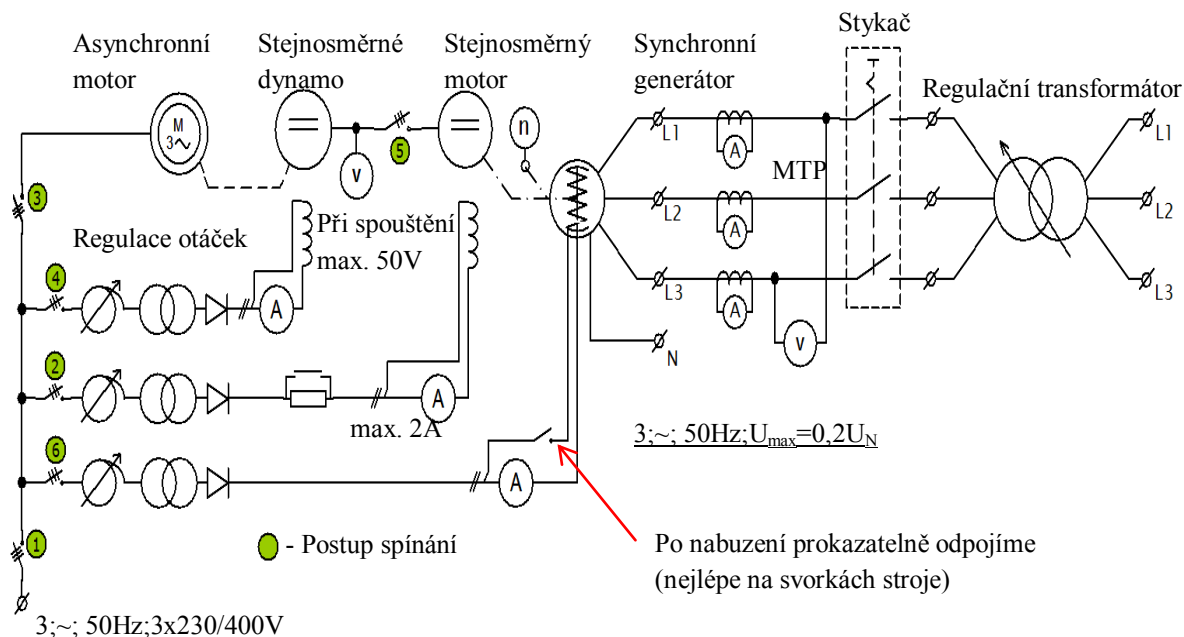
**Postup měření:**

Vše nastavíme a pospojujeme podle schématu na Obr. 15, dbáme na správné sepnutí stykačů ve správném pořadí a nastavení max. hodnot pro daná zařízení, taktéž musíme brát v potaz vysoký zkratový proud na svorkách generátoru, pro jehož měření musíme využít měřících transformátorů proudu se správně zvoleným převodem.

Tímto měřením zjišťujeme charakteristiku nakrátko, tj závislost satorového proudu na budícím proudu  $I_k = f(I_b)$ . Pro určení charakteristik nakrátko musíme satorové vinutí zapojit do zkratu 1-fázově, 2-fázově a 3-fázově. Při měření regulujeme budící proud od nejvyšší hodnoty k nule, kvůli teplotě vinutí daného generátoru, taktéž neprovádíme odečet více než 7-mi měření pro jednotlivé x-fázové spojení.

Z naměřených hodnot viz příloha B, F jsou sestrojeny charakteristiky nakrátko  $I_{k1} = f(I_b)$ ,  $I_{k2} = f(I_b)$ ,  $I_{k3} = f(I_b)$ , tyto průběhy jsou přímky, viz příloha D, H. Z naměřených charakteristik naprázdno a nakrátko je poté možno určit velikosti napětí pro výpočet zpětné, sousledné a nulové reaktance stroje viz příloha C, G.

### 7.3. Měření reaktancí skluzovou metodou:



Obr. 16. - Schéma zapojení pro měření skluzové metody

### Postup měření:

Před touto zkouškou je dobré zjistit, jestli se ve vinutí stroje nenachází zbytkové remanentní napětí a jestli je větší než 0,3 násobek napájecího zkušebního napětí, měl by být rotor demagnetizován. Při měření skluzové metody se na svorky zkoušeného synchronního generátoru připojí snížené souměrné napětí, v našem případě  $0,2U_N$ . Napětí má mít takovou velikost, aby zkoušený stroj nebyl vtažen do synchronismu. Po nabuzení stroje nesmíme zapomenout na rozpojení buzení, nejlépe na svorkách stroje, ale při zapínání a vypínání se budící vinutí musí spojit nakrátko, jinak může dojít k poškození budícího vinutí. Synchronní generátor se bude otáčet podsynchronními otáčkami (skluz cca 1%) a po připojení regulačního transformátoru budeme postupně zvyšovat napětí na svorkách synchronního generátoru a sledovat výchylky V-metru a A-metru. Napětí a otáčky regulujeme tak, abychom mohli odečíst minima a maxima výchylek A-metru a V-metru.

**Změřené hodnoty pro 1. SG:**

$$n = 1500 \text{ ot} / \text{min}$$

$$I_{\min} = 2A \quad U_{\min} = 74V$$

$$I_{\max} = 7A \quad U_{\max} = 77V$$

**Vypočtené hodnoty pro 1. SG**

$$X_d = \frac{U_{\max}}{\sqrt{3} \cdot I_{\min}} = \frac{77}{\sqrt{3} \cdot 2} = \underline{\underline{22,22 \Omega}}$$

$$X_q = \frac{U_{\min}}{\sqrt{3} \cdot I_{\max}} = \frac{74}{\sqrt{3} \cdot 7} = \underline{\underline{6,1 \Omega}}$$

**Změřené hodnoty pro 2. SG:**

$$n = 1000 \text{ ot} / \text{min}$$

$$I_{\min} = 2,1 \text{ A} \quad U_{\min} = 81 \text{ V}$$

$$I_{\max} = 3,8 \text{ A} \quad U_{\max} = 82 \text{ V}$$

**Vypočtené hodnoty pro 2. SG**

$$X_d = \frac{U_{\max}}{\sqrt{3} \cdot I_{\min}} = \frac{82}{\sqrt{3} \cdot 2,1} = \underline{\underline{22,54 \Omega}}$$

$$X_q = \frac{U_{\min}}{\sqrt{3} \cdot I_{\max}} = \frac{81}{\sqrt{3} \cdot 3,8} = \underline{\underline{12,31 \Omega}}$$

Tato zkouška se musí opakovat, pokud výsledek  $X_q$  z tohoto měření není přibližně stejný jako hodnota naměřená ze zkoušky naprázdno a nakrátko. V případě opakované zkoušky se mění skluz eventuálně napětí.

**Porovnání hodnot  $X_d$  z měření naprázdno a nakrátko pro 1. SG:**

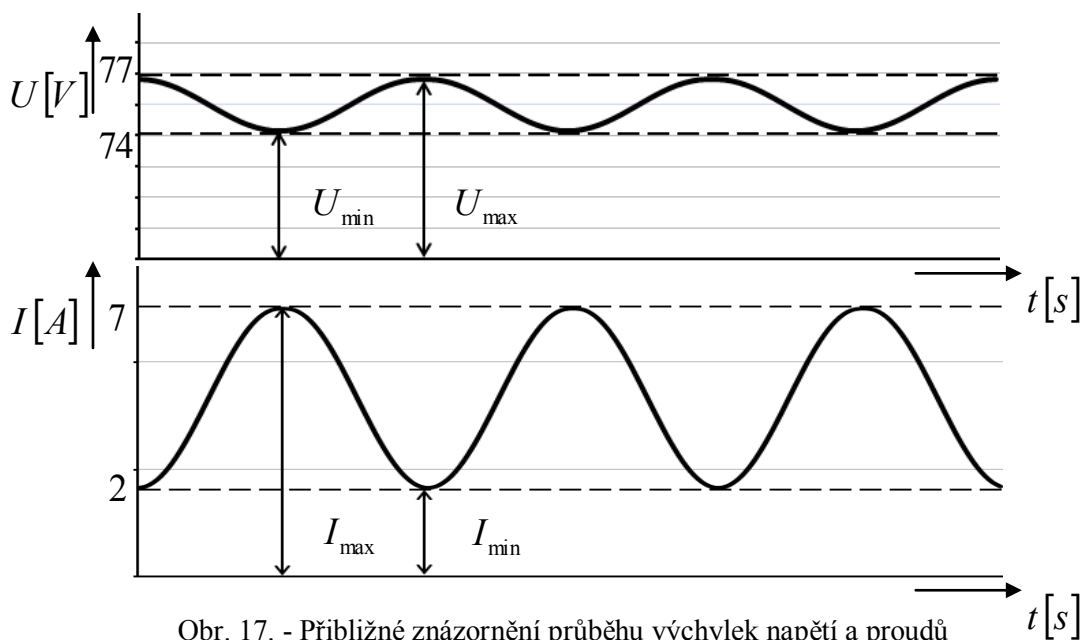
$$X_d = \frac{U_{3k}}{I_{1fn}} = \frac{504}{23} = \underline{\underline{21,91 \Omega}} \approx \underline{\underline{22,22 \Omega}}$$

**Porovnání hodnot  $X_d$  z měření naprázdno a nakrátko pro 2. SG:**

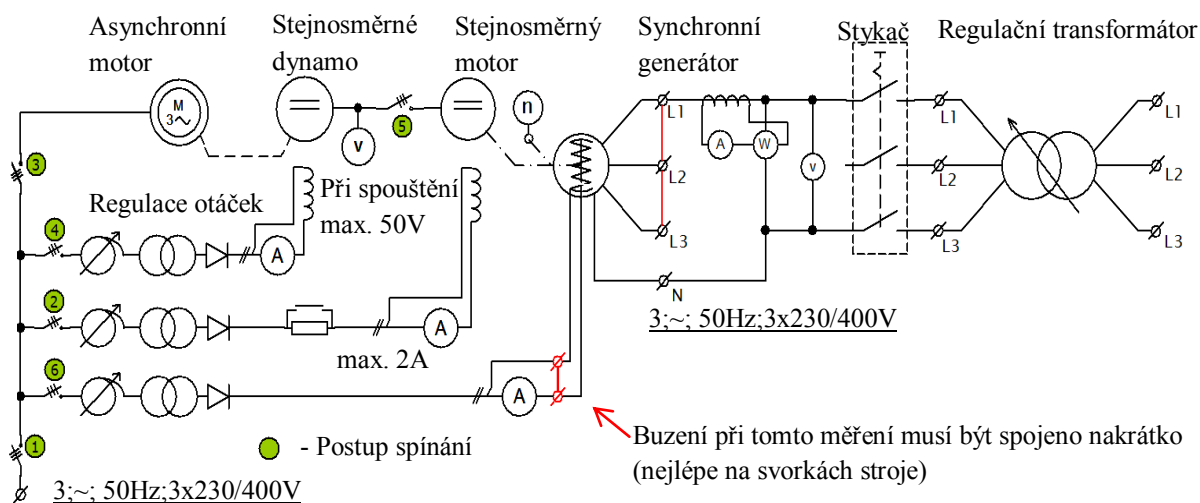
$$X_d = \frac{U_{3k}}{I_{1fn}} = \frac{350}{14,5} = \underline{\underline{24,13 \Omega}} \approx \underline{\underline{22,54 \Omega}}$$

Hodnota  $X_d$  z měření naprázdno a nakrátko je přibližně stejná jako z měření skluzové metody, tudíž můžeme hodnotu  $X_q$  z tohoto měření považovat za správnou.



**Průběhy výchylek V-metrů a A-metrů:**

Obr. 17. - Přibližné znázornění průběhu výchylek napětí a proudů

**7.4. Měření nulové složky:**

Obr. 18. - Schéma zapojení pro měření nulové složky

**Postup měření:**

K provedení této zkoušky se jednofázové napětí připojí na svorky ostatních fází zapojených paralelně viz Obr. 18. Synchronní generátor je při tomto měření poháněn jmenovitými otáčkami, nebo jemu blízkými, buzení stroje je prokazatelně spojeno nakrátko. Po připojení regulačního transformátoru postupně zvyšujeme napětí na svorkách synchronního generátoru tak, aby fáze stroje tekly maximálně  $I_N$ . Jakmile dosáhneme neměnného stavu na zdroji tak odečteme výchylky měřících přístrojů: V-metru, A-metru, W-metru.

**Změřené hodnoty pro 1. SG:**

$$n = 1500 \text{ ot} / \text{min}$$

$$I = 18,8 \text{ A}$$

$$U = 5,3 \text{ V}$$

$$P = 5 \text{ W}$$

**Vypočtené hodnoty pro 1. SG:**

$$Z_0 = \frac{3 \cdot U}{I} = \frac{3 \cdot 5,3}{18,8} = \underline{\underline{0,84 \Omega}}$$

$$R_0 = \frac{3 \cdot P}{I^2} = \frac{3 \cdot 5}{18,8^2} = \underline{\underline{0,042 \Omega}}$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{0,84^2 - 0,042^2} = \underline{\underline{0,838 \Omega}}$$

**Změřené hodnoty pro 2. SG:**

$$n = 1000 \text{ ot} / \text{min}$$

$$I = 16,2 \text{ A}$$

$$U = 9,6 \text{ V}$$

$$P = 40 \text{ W}$$

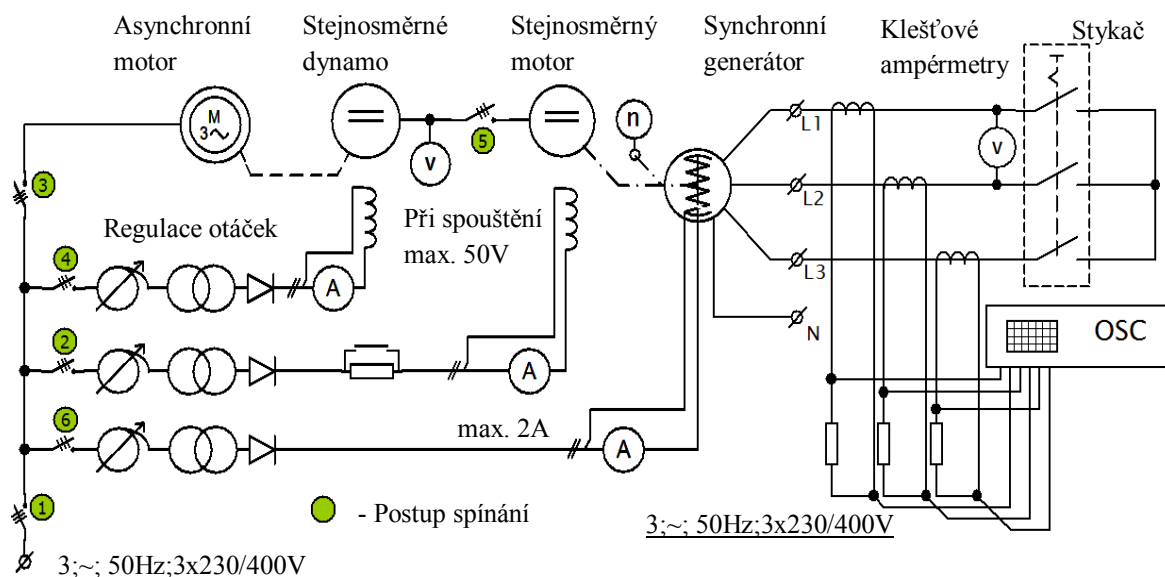
**Vypočtené hodnoty pro 2. SG:**

$$Z_0 = \frac{3 \cdot U}{I} = \frac{3 \cdot 9,6}{16,2} = \underline{\underline{1,77 \Omega}}$$

$$R_0 = \frac{3 \cdot P}{I^2} = \frac{3 \cdot 40}{16,2^2} = \underline{\underline{0,45 \Omega}}$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{1,77^2 - 0,45^2} = \underline{\underline{1,71 \Omega}}$$

### 7.5. Měření náhlého zkratu:



Obr. 19. - Schéma zapojení pro měření náhlého zkratu

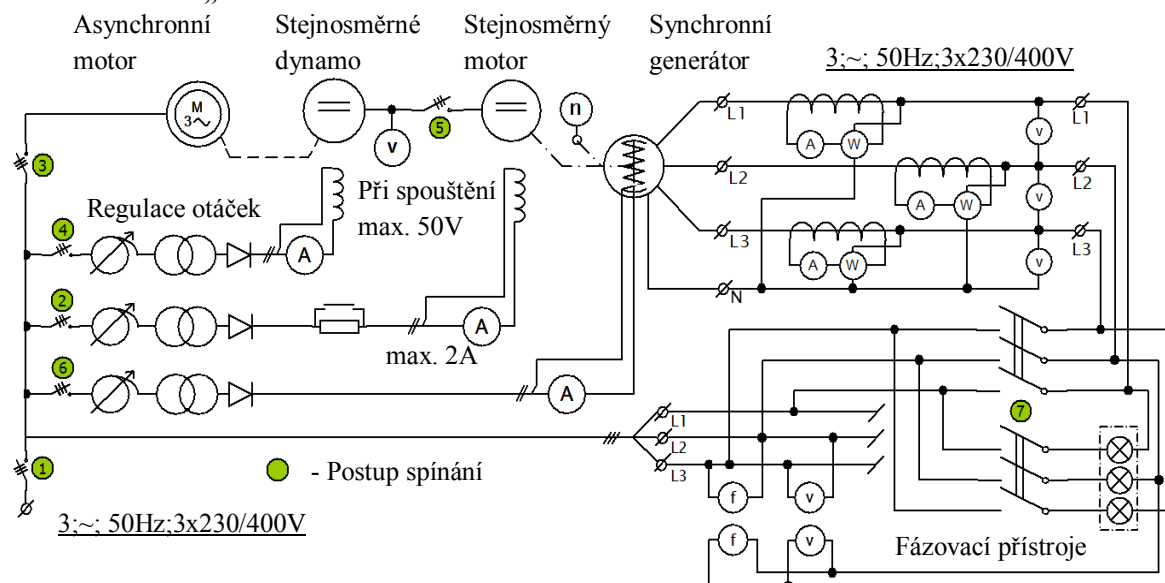
### Postup měření:

Vše nastavíme a pospojujeme podle schématu na Obr. 19, dbáme na správné sepnutí stykačů ve správném pořadí a nastavení max. hodnot pro daná zařízení. Synchronní generátor je roztočen pomocí poháněcího motoru na synchronní otáčky a nabuzen. K určení reaktancí a časových konstant stačí nabudit stroj na  $(0,2-0,3)U_N$ , v tomto případě se pro první generátor nastavilo napětí 80V a pro druhý generátor 120V. Po zapojení měřicího obvodu provedeme nastavení ovládacích funkcí osciloskopu a zkontrolujeme dělicí poměry na klešťových ampérmetrech. Poté pomocí stykače se na krátkou dobu (1-2) s, spojí satorové vinutí a dojde k 3-fázovému zkratu. Pomocí klešťových sond a osciloskopu byl zaznamenán časový průběh proudu v každé fázi a fázové napětí, viz příloha I, O.

### Vyhodnocení průběhu:

Amplitudy zaznamenaného průběhu proudu jedné fáze spojíme pomocí křivítka, křivkami (obálkami), viz příloha J, P. V okamžiku zkratu nakreslíme svislici, která přísluší času  $t=0$ . Určíme stupnici času podle maxim zkratového proudu a její počátek bude v prvním maximu, kde není obálka na protější straně extrapolována. Od tohoto bodu vyneseme stupnici času v měřítku délky jedné periody. V jednotlivých časových okamžicích změříme vzdálenosti obálek v mm, poté můžeme sestavit oscilogram daného zkratového průběhu viz příloha L, R, z těchto oscilogramů dále určíme časové konstanty a reaktance viz příloha K, Q.

Pro výpočet ustáleného zkratového proudu potřebujeme vědět hodnotu  $I_{3k}$ , kterou zjistíme pomocí osciloskopu, je to efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu. V případě 1.SG je hodnota  $I_{3k}=3A$  a u 2.SG je hodnota  $I_{3k}=3,4A$ .

**7.6. Měření „V-křivek“**

Obr. 20. - Schéma zapojení pro měření V-křivek

**Postup měření:**

Vše nastavíme a pospojujeme podle schématu na Obr. 20, dbáme na správné sepnutí stykačů ve správném pořadí a nastavení max. hodnot pro daná zařízení. Při tomto měření je nejdůležitější správné přifázování stroje k síti, postupně regulujeme buzením napětí tak, aby na měřicím přístroji  $\Delta U$  byla minimální výchylka. Dále na přístroji 2xHz musí být v rezonanci jazýčky pod sebou a synchronoskopem kontrolujeme otáčející se ručičku, která když projde tučně vyznačenou částí a na přístroji  $\Delta U$  je minimální výchylka, můžeme sepnout stykač a synchronní generátor přifázovat k síti. Velice důležité je rozdílné frekvence zkoušeného stroje a sítě, protože ten nesmí být nikdy nulový a zároveň moc velký, jinak by mohlo dojít k proudovému rázu.

Měření V- křivky se provádí až po přifázování synchronního generátoru na síť a jeho cílem je zjistit závislost  $I_1 = f(I_f)$  při  $P = 0$ , ( $U_1$  a  $f = konst.$ ). Jestliže synchronní generátor paralelně spolupracuje se sítí, pak závislost statorového proudu na budícím proudu při konstantním výkonu, má tvar písmene V. Podle použitého generátoru zatížíme hřídel momentem  $M_N$  a postupně změříme proud procházející statorem při zvyšování proudu  $I_b$ . Po určitém zvyšování dosáhneme minimálního statorového proudu, to je minimum V-křivky, pokud budeme dále proud  $I_b$  zvyšovat, tak dosáhneme až maximálního statorového proudu  $I_N$ .

**Odpojení synchronního stroje od sítě:**

Daný generátor musíme nejdříve odlehčit od zatížení, poté jej odpojíme od přifázované sítě a nakonec jej odbudíme.

Z naměřených hodnot byl zkonstruován graf, viz příloha N.

Vysvětlivky ke grafu:

- Bod 1 náleží výkonu  $P_N$  při  $U_N$ ,  $f_N$ ,  $\cos\varphi = 1$  a  $I_b$ . Na tuto hodnotu se daný typ stroj navrhuje
- Křivka 1: Vznikne při chodu daného generátoru naprázdno
- Křivka 2: Vznikne při konstantním zatížení daného generátoru
- Křivka 3: Tato křivka rozdělí oblast daného generátoru na přebuzený a podbuzený stav.
- Křivka 4: Jak lze vidět z grafu, tak tato křivka udává hranici, kdy daný generátor může vypadnout ze synchronismu.

### 7.7. Měření teploty

Pro měření teploty se použije odporová metoda, teplota se určí z přírůstku odporu, měří se přímo na svorkách stroje, který je odpojen od sítě. Teplota okolí se může vzít za teplotu vinutí jen tehdy, měří-li se na zcela vychlazeném stroji a nekolísá-li příliš denní teplota okolí.

Pro výpočet oteplení použijeme následující vztah:

$$\Delta \vartheta = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \cdot (235 + \vartheta_1)$$

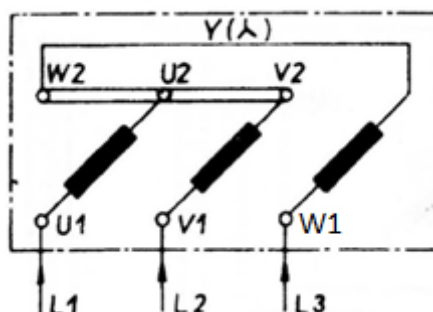
$R_2$  - odpor vinutí na konci měření

$R_1$  - odpor vinutí na začátku měření

$\vartheta_1$  - teplota vinutí na začátku měření

Značení svorkovnice

Pro oba synchronní generátory platí stejné zapojení, viz obr. 21, statorové vinutí bylo zapojeno do hvězdy.



Obr. 21. - Spojení a značení svorek

**Tabulky naměřených hodnot pro 1.SG:**

Svorky	Před ( $\Omega$ )	Po ( $\Omega$ )
R(U1-W2)	1,4	1,8
R(V1-U2)	1,5	1,8
R(W1-V2)	1,4	1,8
Průměr	1,43	1,8

Tab. 3. - Změřené odpory pro 1.SG

**Tabulky naměřených hodnot pro 2.SG:**

Svorky	Před ( $\Omega$ )	Po ( $\Omega$ )
R(U1-W2)	1,3	1,6
R(V1-U2)	1,4	1,7
R(W1-V2)	1,3	1,6
Průměr	1,33	1,63

Tab. 4. - Změřené odpory pro 2.SG

**Výsledná teplota pro 1.SG**

$$\Delta \vartheta = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \cdot (235 + \vartheta_1) = \frac{1,8 - 1,43}{1,43} \cdot (235 + 20) = \underline{\underline{65,97^\circ C}}$$

**Výsledná teplota pro 2.SG**

$$\Delta \vartheta = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \cdot (235 + \vartheta_1) = \frac{1,63 - 1,33}{1,33} \cdot (235 + 20) = \underline{\underline{57,51^\circ C}}$$

**7.8. Použité měřicí přístroje**

Regulační transformátor	typ: RA 3x20	Výrobní číslo: 021269	
Osciloskop Wavesurfer 3024	typ: 3024	Výrobní číslo: LCRY3701N12419	
Osciloskop OWON	typ: PDS8202T	Výrobní číslo: PDS8202T1105163	
Měřicí sonda Kyoritsu	typ: 8112	Výrobní číslo: W0141057	
Měřicí sonda Kyoritsu	typ: 8112	Výrobní číslo: W0141057	
Měřicí sonda Chauvin Arnoux	typ: CARE3N	Výrobní číslo: P01120043A	
Měřicí transformátor proudu	typ: TL 20	Evidenční číslo: 541/673	t.p: 0,05
Měřicí transformátor proudu	typ: TL 20	Evidenční číslo: 541/520	t.p: 0,05
Měřicí transformátor proudu	typ: TL 20	Evidenční číslo: 541/533	t.p: 0,05
Wattmetr - $\cos\varphi=1$	typ: EL 21	Výrobní číslo: 2532020	t.p: 0,2
Wattmetr - $\cos\varphi=1$	typ: EL 21	Výrobní číslo: 2531263	t.p: 0,2
Wattmetr - $\cos\varphi=1$	typ: EL 21	Výrobní číslo: 9105443	t.p: 0,2
Voltmetr		Evidenční číslo: 573/472	t.p: 1,5
Voltmetr		Evidenční číslo: 573/447	t.p: 1,5
Voltmetr		Evidenční číslo: 573/422	t.p: 1,5
Ampérmetr		Evidenční číslo: 14474	t.p: 1
Ampérmetr		Evidenční číslo: 58618	t.p: 1
Ampérmetr		Evidenční číslo: 14482	t.p: 1

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo změřit synchronní generátory používané v prostorách školy a vytvořit pro ně kontrolní protokol, který by sloužil jako návod a opora při dalších měření. Měření bylo prováděno v souladu s platnými normami ČSN 35 0000, část použitých zkoušek definuje norma ČSN EN 60034-4.

V první části této práce se zabývám základním popisem principu synchronního stroje, jsou zde uvedeny základní vzorce, které se budou dále využívat v praktické části, dále jsou popsány základní zkoušky a měření pro typovou a kusovou zkoušku. Jen část těchto zkoušek byla provedena v praktické části, neboť kompletní měření bychom z důvodu vybavení, času a bezpečnosti nemohli provést.

Z měření naprázdno a nakrátko u obou měřených generátorů můžeme vidět, že při zvyšování budícího proudu a následně jeho snižováním dostaneme hysterezní smyčku, dále můžeme vidět, že část tohoto průběhu je přímková, této části se říká charakteristika nasyceného stroje nebo také charakteristika vzduchové mezery. Při vytváření grafu musíme dbát na přesnost sestavené tečny k průběhu, jinak můžeme velice snadno vnášet do následných výpočtů chybu. Z měření nakrátko můžeme vidět, že průběhy zkratových proudů jsou přímky. Dále jsou z těchto grafů odečteny další hodnoty pro vyhodnocení výpočtů sousledné, zpětné, nulové reaktance, míra sycení a zkratový poměr.

Z měření skluzové metody zjistíme hodnoty  $X_q$  a  $X_d$ , které by měli odpovídat vypočteným hodnotám z měření naprázdno a nakrátko, pokud by tomu tak nebylo, měla by se tato zkouška opakovat při jiném skluzu, eventuálně napětí. V tomto případě se změřené hodnoty pro první generátor lišily o 1% a pro druhý generátor o 7%, tyto výsledky považuji za správné, jelikož velmi záleží na zkonstruované tečně ke grafu z měření naprázdno a nakrátko.

Při měření nulových složek musíme dbát na správném zapojení a hlídat protékající proud, který teče fází stroje, neměl by být vyšší, než je uvedeno na štítku daného stroje, jde o jmenovitý proud, tento proud nastavujeme regulačním transformátorem.

Z měření náhlým zkratem je důležité, abychom testovaný stroj nabudili na max. 30%  $U_N$ . Při plném nabuzení a zkratu by mohlo dojít k mechanickému poškození. Dbáme na správně zvolené rozsahy na klešťových ampérmetrech a na správně nastaveném osciloskopu, jinak výsledný zkratový proud můžeme špatně vyhodnotit. Z ustáleného zkratového proudu, který následuje po odeznění rázového proudu, odečteme důležitou efektivní hodnotu  $I_{3K}$ , bez které bychom nemohli s vyhodnocením pokračovat. Dále si průběh 3-fázového zkratového proudu vyexportujeme do PC, kde využijeme průběhu jedné fáze začínajíc v nule a ten dále upravíme. Z tohoto průběhu pomocí křivítka určíme obalové složky a rozkmit pro každou periodu proudu,



z těchto hodnot dále zkonstruujeme oscilogram, ze kterého určíme časové konstanty a vypočítáme rázové a přechodné reaktance.

Při měření V-křivek, měření probíhalo v generátorickém chodu. Z naměřeného průběhu, který nám vyšel je patrné, že motor spolupracoval se sítí a závislost statorového proudu na budícím napětí má tvar písmene V. Měření probíhalo jen pro první synchronní generátor, z důvodu závady na ovládacím pultu na druhém měřicím pracovišti.

Při měření teploty na motorech se použila odporová metoda a teplota se stanovila z přírůstku odporu.

Za přínos této práce považuji to, že jsem mohl vytvořit studijní materiál, který může sloužit jako studijní opora při dalších měření. Taktéž tato práce může být rozšířena o další metody zkoušení.

**Literatura**

- [1] Rudolf Mravec: Elektrické stroje a přístroje – I. Elektrické stroje, Praha 1979, Státní nakladatelství technické literatury, 424 s.
- [2] Jan Bašta, Vojtěch Kulda, Jiří Měřička a kolektiv: Měření na Elektrických strojích I. Všeobecná část, Praha 1959, Státní nakladatelství technické literatury, 304 s.
- [3] ČSN 35 0000-1-1. Točivé elektrické stroje: Část 1-1: Doplnující požadavky. Praha 1997, Český normalizační institut, 1997. 36 s.
- [4] Stanislav Kocman: Synchronní stroje, Ostrava 2004, Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB – TU Ostrava, 6 s.
- [5] Stanislav Mišák: Určení parametrů synchronního generátoru, měření provozních a poruchových stavů synchronního generátoru, Příloha P1, 20 s.
- [6] Stanislav Kocman: Synchronní stroje, Ostrava 2000, Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB – TU Ostrava, 10 s.
- [7] ČSN 35 0010. Točivé elektrické stroje: Zkoušky. Praha 1992, Vydavatelství norem. 52s.
- [8] ČSN EN 60034-4 ed. 2. Točivé elektrické stroje. Část 4: Metody určování veličin synchronních strojů ze zkoušek, 2009, Česká technická norma
- [9] Jaroslav Smetana: Měření vybraných parametrů izolace, Veletržní Elektro. MSV v Brně. Elektro 8-9/2009. Str. 42.
- [10] Karel Chmelík, Karel Záliš, Stanislav Mišák, Jiří Kozelský: Technická Diagnostika na Elektrických Zařízeních. Asociace technických diagnostiků České republiky o.s.Str. 140.

**Přílohy**

- A Tabulky naměřených hodnot z měření naprázdno pro 1. SG
- B Tabulky naměřených hodnot z měření nakrátko pro 1. SG
- C Určování parametrů z měření naprázdno a nakrátko pro 1.SG
- D Grafy naprázdno a nakrátko pro 1.SG:
- E Tabulky naměřených hodnot z měření naprázdno pro 2. SG
- F Tabulky naměřených hodnot z měření nakrátko pro 2. SG
- G Určování parametrů z měření naprázdno a nakrátko pro 2.SG
- H Grafy naprázdno a nakrátko pro 2. SG
- I Průběh zkratového proudu jedné fáze 1.SG vyexportovaný z osciloskopu při 20% nabuzení
- J Upravený časový průběh zkratového proudu jedné fáze se stejnosměrnou složkou pro 1.SG
- K Naměřené a vypočtené hodnoty pro zkratový proud 1.SG
- L Rozbor oscilogramu zkratového proudu pro 1. SG:
- M Tabulky naměřených hodnot V-křivek pro 1. SG:
- N Graf průběhu V-křivek pro 1. SG
- O Průběh 3-fázového zkratového proudu 2.SG vyexportovaný z osciloskopu při 30% nabuzení
- P Upravený časový průběh zkratového proudu jedné fáze se stejnosměrnou složkou 2.SG
- Q Naměřené a vypočtené hodnoty pro zkratový proud 2.SG
- R Rozbor oscilogramu zkratového proudu pro 2. Synchronní generátor

**Příloha A: Tabulky naměřených hodnot z měření naprázdno pro 1. SG**

$I_b$ (A)	Přibuzování			Odbuzování		
	$U_{f1}$ (V) ↑	$U_{f2}$ (V) ↑	$U_{f3}$ (V) ↑	$U_{f1}$ (V) ↓	$U_{f2}$ (V) ↓	$U_{f3}$ (V) ↓
0	9	9	8	10	10	10
1	98	97	95	104	102	102
2	166	166	165	174	172	170
2,8	202	202	201	210	210	208
3,2	214	214	212	220	218	218
3,5	220	218	216	226	226	222
3,8	226	224	224	230	230	230
4,1	230	230	228	235	240	235
5	240	240	240	250	260	255
6	260	265	260	267	270	267
7	280	280	280	283	283	283
9	295	295	295	295	295	295
11	305	305	305	305	305	305

Tab. 5. - Měření naprázdno 1.SG

**Tabulky vypočtených hodnot pro 1. SG**

$I_b$ (A)	0	1	2	2,8	3,2	3,5	3,8	4,1	5	6	7	9	11
$U_f$ (V) ↑	8,67	96,6	165,6	201,6	213,3	218	224,6	229,3	240	261,6	280	295	305
$U_f$ (V) ↓	9,6	102,6	172	209,3	218,6	224,6	230	236,6	255	268	283	295	305

Tab. 6. - Algebraické průměry z přibuzování a odbuzování 1.SG

$I_b$ (A)	0	1	2	2,8	3,2	3,5	3,8	4,1	5	6	7	9	11
$U_0=f(I_b)$	9,17	99,6	168,8	205,5	216	221,3	227,3	233	247,5	264,8	281,5	295	305

Tab. 7. - Střední hodnoty z algebraických průměrů 1.SG

**Příloha B: Tabulky naměřených hodnot z měření nakrátko pro 1. SG**

$I_b$ (A)	$I_{k1}$ (A)	$I_{k2}$ (A)	$I_{k3}$ (A)
0	0	0	0
0,8	4	4	4
2,2	10	10	10
3,2	14	14	14
4,6	20	20	20
5,4	23	23	23

Tab. 8. - Měření 3-pólového spojení nakrátko 1.SG

$I_b$ (A)	$I_{k12}$ (A)	$I_{k23}$ (A)	$I_{k13}$ (A)
0	0	0	0
0,5	4	4	4
1,4	10	10	10
2	14	14	14
2,8	20	20	20
3,1	23	23	23

Tab. 9. - Měření 2-pólového spojení nakrátko 1.SG

$I_b$ (A)	$I_{k1}$ (A)	$I_{k2}$ (A)	$I_{k3}$ (A)
0	0	0	0
0,1	2,7	2,8	2,8
0,2	3,7	3,8	3,9
1	12,6	12,8	12,8
1,6	20	20	20
1,8	23	23	23

Tab. 10. - Měření 1-pólového spojení nakrátko 1.SG

**Tabulky vypočtených hodnot 1. SG**

$I_b$ (A)	0	0,8	2,2	3,2	4,6	5,4
$I_{k3}=f(I_b)$	0	4	10	14	20	23

Tab. 11. - Algebraický průměr 3-pólového měření nakrátko 1.SG

$I_b$ (A)	0	0,5	1,4	2	2,8	3,1
$I_{k2}=f(I_b)$	0	4	10	14	20	23

Tab. 12. - Algebraický průměr 2-pólového měření nakrátko 1.SG

$I_b$ (A)	0	0,1	0,2	1	1,6	1,8
$I_{k1}=f(I_b)$	0	2,76	3,8	12,73	20	23

Tab. 13. - Algebraický průměr 1-pólového měření nakrátko 1.SG

**Příloha C: Určování parametrů z měření naprázdno a nakrátko pro 1.SG**

Sousledná reaktance

$$X_d = \frac{U_{3k}}{I_{1fn}} = \frac{504}{23} = \underline{\underline{21,91\Omega}}$$

Zpětná reaktance

$$X_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{2k} - U_{3k}}{I_{1fn}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 300 - 504}{23} = \underline{\underline{0,68\Omega}}$$

Nulová reaktance

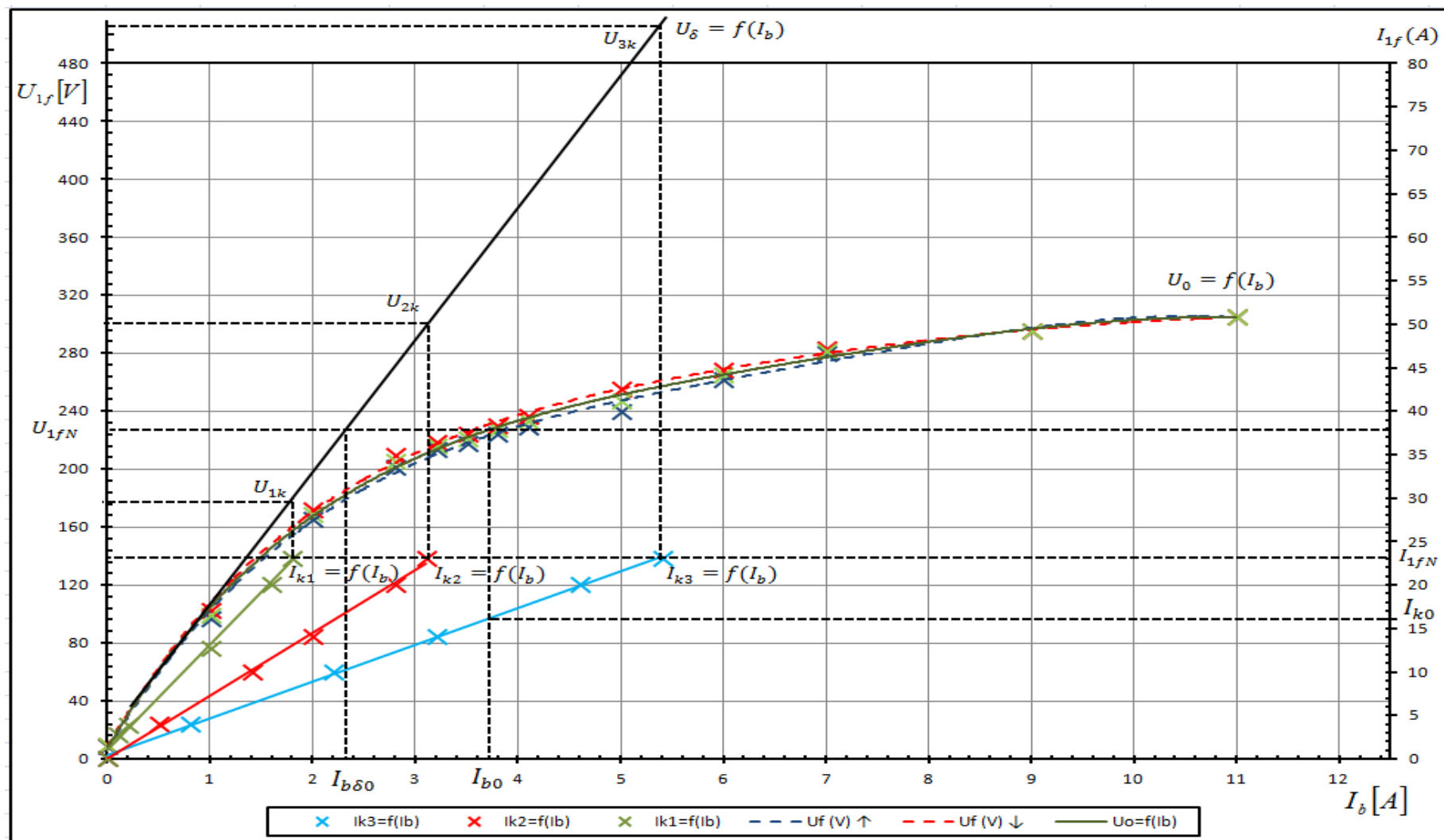
$$X_0 = \frac{3 \cdot U_{1k} - \sqrt{3} \cdot U_{2k}}{I_{1fn}} = \frac{3 \cdot 180 - \sqrt{3} \cdot 300}{23} = \underline{\underline{0,88\Omega}}$$

Míra sycení

$$\mu = \frac{I_{bo}}{I_{b\partial 0}} = \frac{3,7}{2,3} = \underline{\underline{1,6[-]}}$$

Zkratový poměr

$$\nu_k = \frac{I_{k0}}{I_{1fn}} = \frac{16}{23} = \underline{\underline{0,69[-]}}$$

**Příloha D: Grafy naprázdno a nakrátko pro 1.SG:**

Obr. 22. - Grafy průběhů naprázdno a nakrátko

**Příloha E: Tabulky naměřených hodnot z měření naprázdno pro 2. SG**

$I_b$ (A)	Přibuzování			Odbuzování		
	$U_{f1}$ (V) ↑	$U_{f2}$ (V) ↑	$U_{f3}$ (V) ↑	$U_{f1}$ (V) ↓	$U_{f2}$ (V) ↓	$U_{f3}$ (V) ↓
0	6,9	6,9	6,9	10	10	10
1	83	84	83	95	95	95
2	169	168	169	175	175	175
2,5	181	181	183	199	200	200
2,7	196	198	196	211	212	211
2,9	209	209	211	220	220	220
3,1	217	217	217	225	224	225
3,3	223	223	223	233	233	232
3,5	229	229	230	238	238	237
3,7	236	236	235	242	240	242
3,9	240	240	240	245	245	245
5,1	262	265	262	262	262	262
6,5	276	276	276	276	276	276
8,5	292	292	292	292	292	292
11	305	305	305	305	305	305

Tab. 14. - Měření naprázdno 2.SG

**Tabulky vypočtených hodnot 2. SG:**

$I_b$ (A)	0	1	2	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	5,1	6,5	8,5	11
$U_f$ (V) ↑	6,9	83,3	168,6	181,6	196,6	209,6	217	223	229,3	235,6	240	263	276	292	305
$U_f$ (V) ↓	10	95	175	199,6	211,3	220	224,6	232,6	237,6	241,3	245	262	276	292	305

Tab. 15. - Algebraické průměry z přibuzování a odbuzování 2.SG

$I_b$ (A)	0	1	2	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	5,1	6,5	8,5	11
$U_0=f(I_b)$	8,4	89,1	171,8	190,6	204	214,8	220,8	227,8	233,5	238,5	242,5	262,5	276	292	305

Tab. 16. - Střední hodnoty z algebraických průměrů 2.SG



**Příloha F: Tabulky naměřených hodnot z měření nakrátko pro 2. SG**

$I_b$ (A)	$I_{k1}$ (A)	$I_{k2}$ (A)	$I_{k3}$ (A)
0	0	0	0
2,5	9,1	9,1	9,2
3,1	11,1	11,2	11,2
3,8	13,5	13,5	13,6
4,5	15,9	15,8	16
5	17,7	17,8	17,8

Tab. 17. - Měření 3-pólového spojení nakrátko 2.SG

$I_b$ (A)	$I_{k12}$ (A)	$I_{k23}$ (A)	$I_{k13}$ (A)
0	0	0	0
2	10,9	11,2	10,8
2,5	13,7	13,8	13,6
3	15,7	15,8	15,9
3,5	18	18	18

Tab. 18. - Měření 2-pólového spojení nakrátko 2.SG

$I_b$ (A)	$I_{k1}$ (A)	$I_{k2}$ (A)	$I_{k3}$ (A)
0	0	0	0
1,2	12,1	12,2	11,9
1,4	13,7	13,7	13,5
1,6	14,9	14,7	14,8
1,8	17,5	17,6	17,4
2	19,2	18,9	19,1

Tab. 19. - Měření 1-pólového spojení nakrátko 2.SG

**Tabulky vypočtených hodnot 2. SG:**

$I_b$ (A)	0	2,5	3,1	3,8	4,5	5
$I_{k3}=f(I_b)$	0	9,13	11,17	13,53	15,9	17,77

Tab. 20. - Algebraický průměr 3-pólového měření nakrátko 2.SG

$I_b$ (A)	0	2	2,5	3	3,5
$I_{k2}=f(I_b)$	0	10,97	13,7	15,8	18

Tab. 21. - Algebraický průměr 2-pólového měření nakrátko 2.SG

$I_b$ (A)	0	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$I_{k1}=f(I_b)$	0	12,07	13,63	14,8	17,5	19,07

Tab. 22. - Algebraický průměr 1-pólového měření nakrátko 2.SG

**Příloha G: Určování parametrů z měření naprázdno a nakrátko pro 2.SG**

Sousledná reaktance

$$X_d = \frac{U_{3k}}{I_{1fn}} = \frac{350}{14,5} = \underline{\underline{24,13 \Omega}}$$

Zpětná reaktance

$$X_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{2k} - U_{3k}}{I_{1fn}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 242 - 350}{14,5} = \underline{\underline{4,76 \Omega}}$$

Nulová reaktance

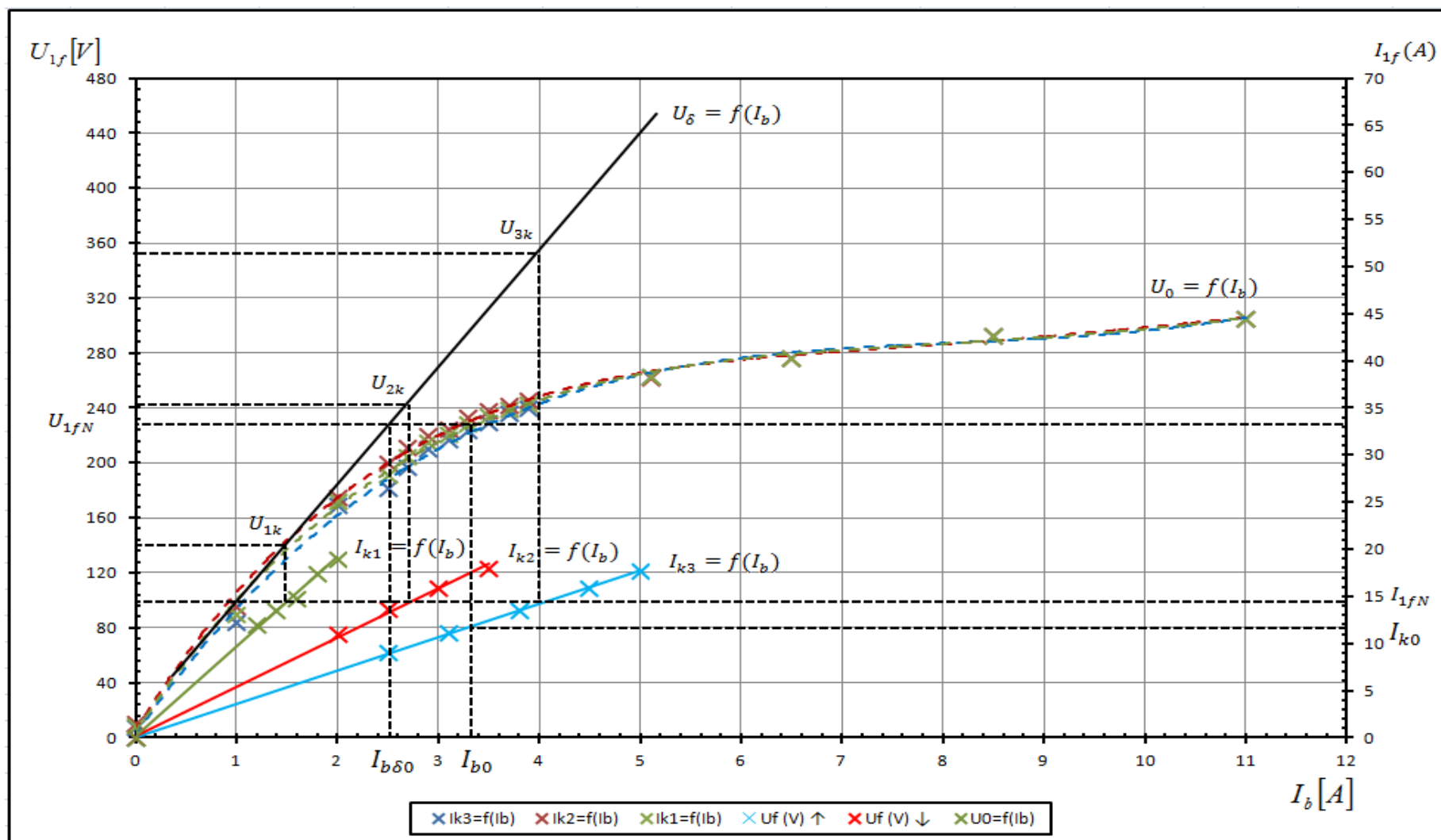
$$X_0 = \frac{3 \cdot U_{1k} - \sqrt{3} \cdot U_{2k}}{I_{1fn}} = \frac{3 \cdot 140 - \sqrt{3} \cdot 242}{14,5} = \underline{\underline{0,058 \Omega}}$$

Míra sycení

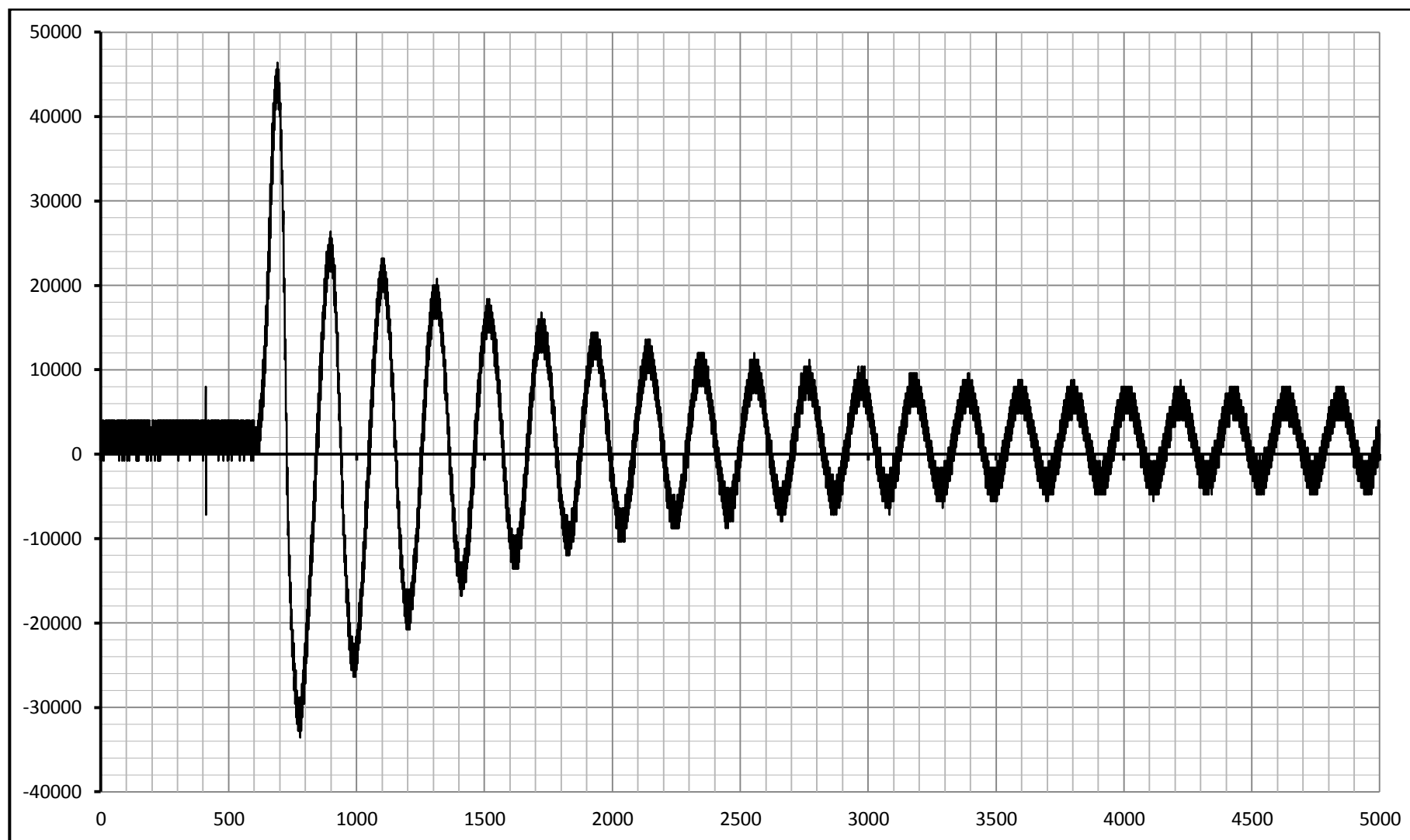
$$\mu = \frac{I_{bo}}{I_{bc0}} = \frac{3,35}{2,5} = \underline{\underline{1,34 [-]}}$$

Zkratový poměr

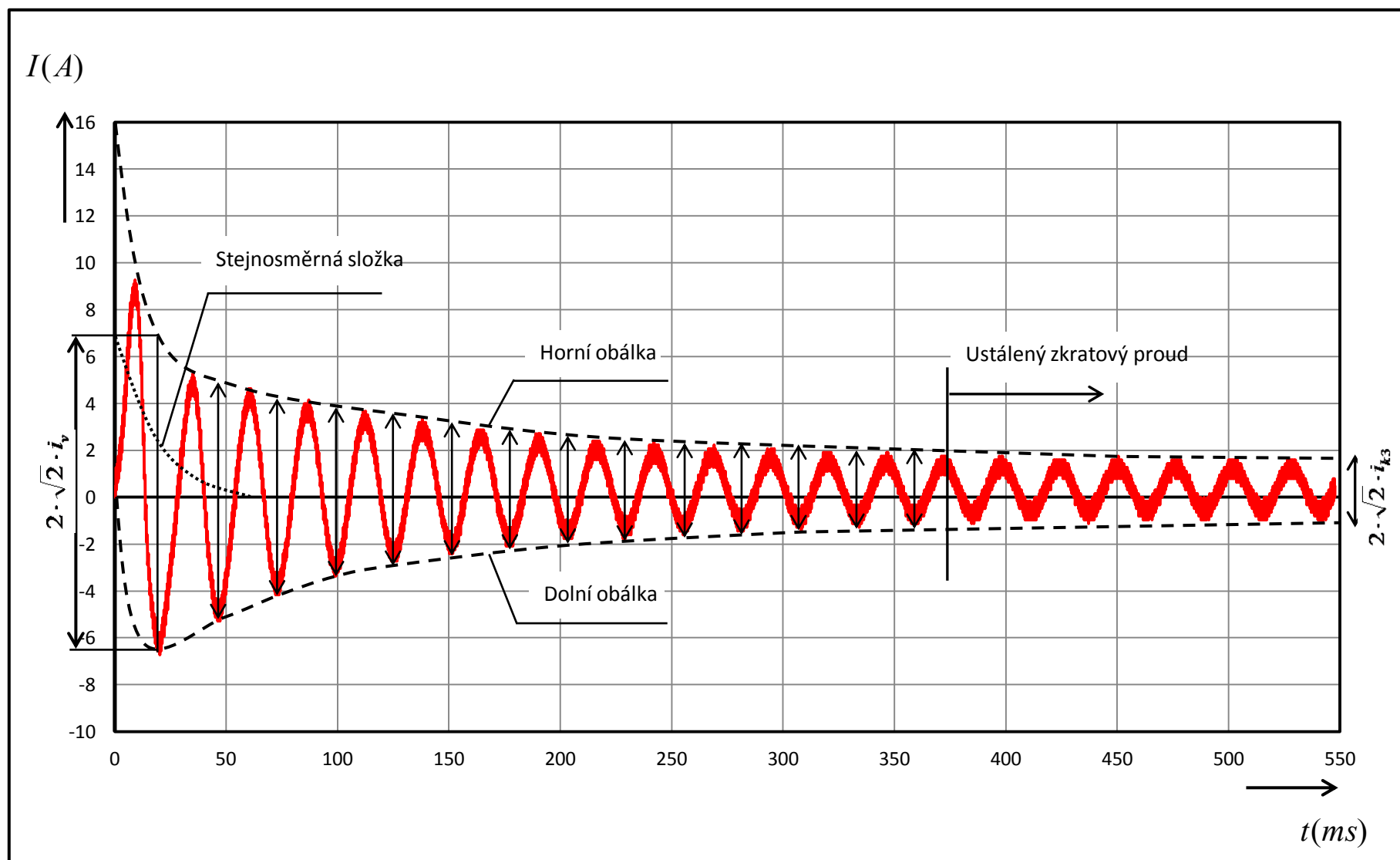
$$\nu_k = \frac{I_{k0}}{I_{1fn}} = \frac{11,5}{14,5} = \underline{\underline{0,793 [-]}}$$

**Příloha H: Grafy naprázdno a nakrátko pro 2. SG**

Obr. 23. - Grafy průběhů naprázdno a nakrátko 2.SG

**Příloha I: Průběh zkratového proudu jedné fáze 1.SG vyexportovaný z osciloskopu při 20% nabuzení**

Obr. 24. - Průběh zkratového proudu jedné fáze neupravený 1.SG

**Příloha J: Upravený časový průběh zkratového proudu jedné fáze se stejnosměrnou složkou pro 1.SG**

Obr. 25. - Průběh zkratového proudu jedné fáze a obalové křivky zkratového proudu 1.SG

**Příloha K: Naměřené a vypočtené hodnoty pro zkratový proud 1.SG****Naměřené hodnoty před zkratem pro 1. SG:**

$$n = 1500 \text{ ot} / \text{min} \quad I_b = 0,52 \text{ A} \quad U = 80 \text{ V}$$

**Maximální hodnota rozkmitu pro 1. SG:**

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{3K} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 3 = 8,48 \text{ A}$$

Určení rozkmitu provedeme tak, že odečteme hodnotu v mm mezi obalovými křivkami ustáleného zkratového proudu, viz příloha J Obr. 25 časový průběh zkratového proudu jedné fáze se stejnosměrnou složkou

**Určení měřítka pro 1. SG:**

$$\frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{3K}}{\text{rozkmít}} = \frac{8,48}{7} = \underline{\underline{1,21 \text{ A} / \text{mm}}}$$

**Určení hodnot ze semilogaritmického grafu:**

Ze semilogaritmického grafu odečteme hodnoty pro výpočet  $i'_{k0}$  a  $i''_{k0}$

$$\begin{aligned} 2 \cdot \sqrt{2} \cdot i'_{k0} &= 34 \text{ A} \\ i'_{k0} &= \frac{34}{2 \cdot \sqrt{2}} \\ i'_{k0} &= \underline{\underline{12,02 \text{ A}}} \end{aligned}$$

Určení přechodné časové konstanty  $\tau'_d$

$$0,368 \cdot i'_{k0} = 0,368 \cdot 12,02 = 4,42 \text{ A}$$

$$\text{- Z grafu odečteme } \tau'_d = 0,235 = \underline{\underline{235 \text{ ms}}}$$

Rozdílem maxima  $I'_{km}$  a extrapolované hodnoty  $2 \cdot \sqrt{2} \cdot i'_{k0}$  dostáváme

$$I'_{km} = 41 A$$

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot i'_{k0} = 34 A$$

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot i'_{k0} = I'_{km} - 2 \cdot \sqrt{2} \cdot i'_{k0} = 41 - 34 = 7 A$$

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot i''_{k0} = 7 A$$

$$i''_{k0} = \frac{7}{2 \cdot \sqrt{2}}$$

$$i''_{k0} = \underline{\underline{2,47 A}}$$

Určení rázové časové konstanty  $\tau_d''$

$$0,368 \cdot i''_{k0} = 0,368 \cdot 2,47 = \underline{\underline{0,9 A}}$$

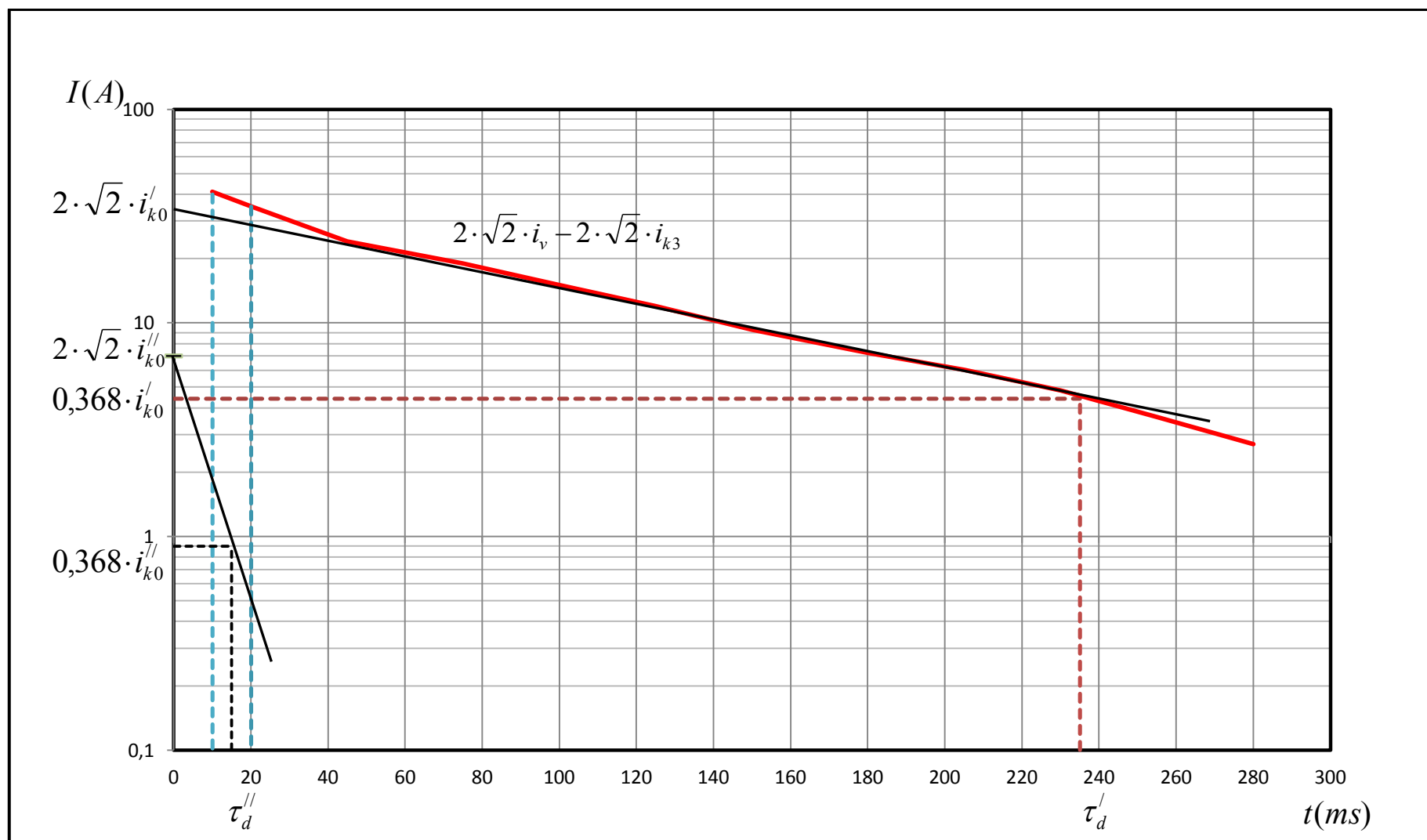
$$- \text{ Z grafu odečteme } \tau_d'' = 0,015 = \underline{\underline{15 ms}}$$

Určení přechodné reaktance  $X'_d$

$$X'_d = \frac{U_{1fN}}{I_{k3} + I'_{k0}} = \frac{80}{3 + 12,02} = \underline{\underline{5,32 \Omega}}$$

Určení rázové reaktance  $X''_d$

$$X''_d = \frac{U_{1fN}}{I_{k3} + I'_{k0} + I''_{k0}} = \frac{80}{3 + 12,02 + 2,47} = \underline{\underline{4,57 \Omega}}$$

**Příloha L: Rozbor oscilogramu zkratového proudu pro 1. SG:**

Obr. 26. - Určení reaktancí a časových konstant zkratového proudu 1.SG



**Příloha M: Tabulky naměřených hodnot V-křivek pro 1. SG:**

P=0kW													
I <sub>b</sub>	0,1	0,4	1,4	1,8	2,4	3,6	5,2	5,8	6,3	6,8	7,4	8,1	9,2
I	15,2	14	10	8,4	6	0	4,2	6,1	7,3	9,1	11,1	13,2	16,3

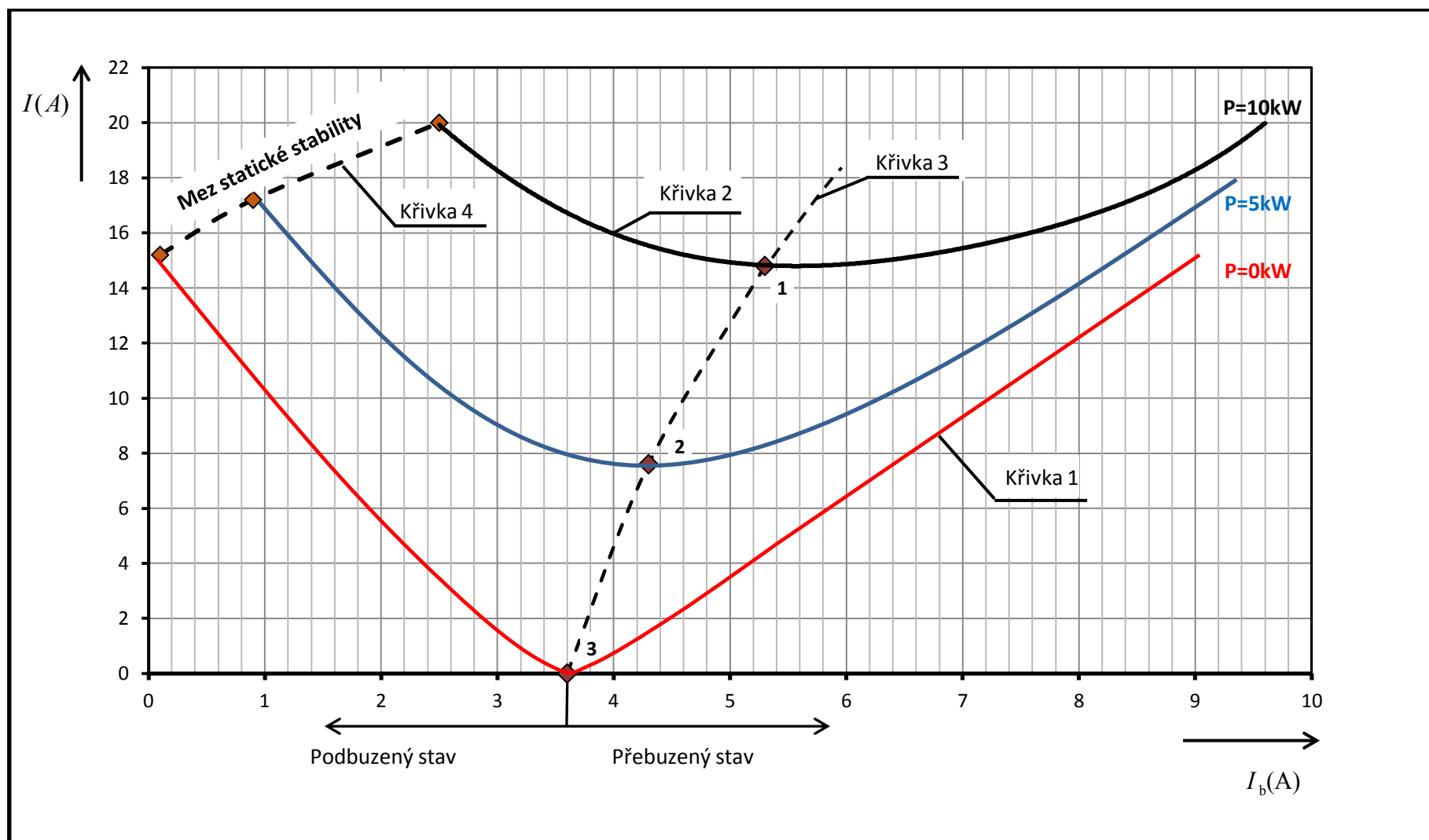
Tab. 23. - Změřené hodnoty pro P=0kW 1.SG

P=5kW													
I <sub>b</sub>	0,9	1,4	2,4	3,1	4,3	5,2	6,1	7,1	8,4	8,8	9,4		
I	17,2	14,45	11	9,4	7,6	8	9,2	11,6	14,8	16,4	18,1		

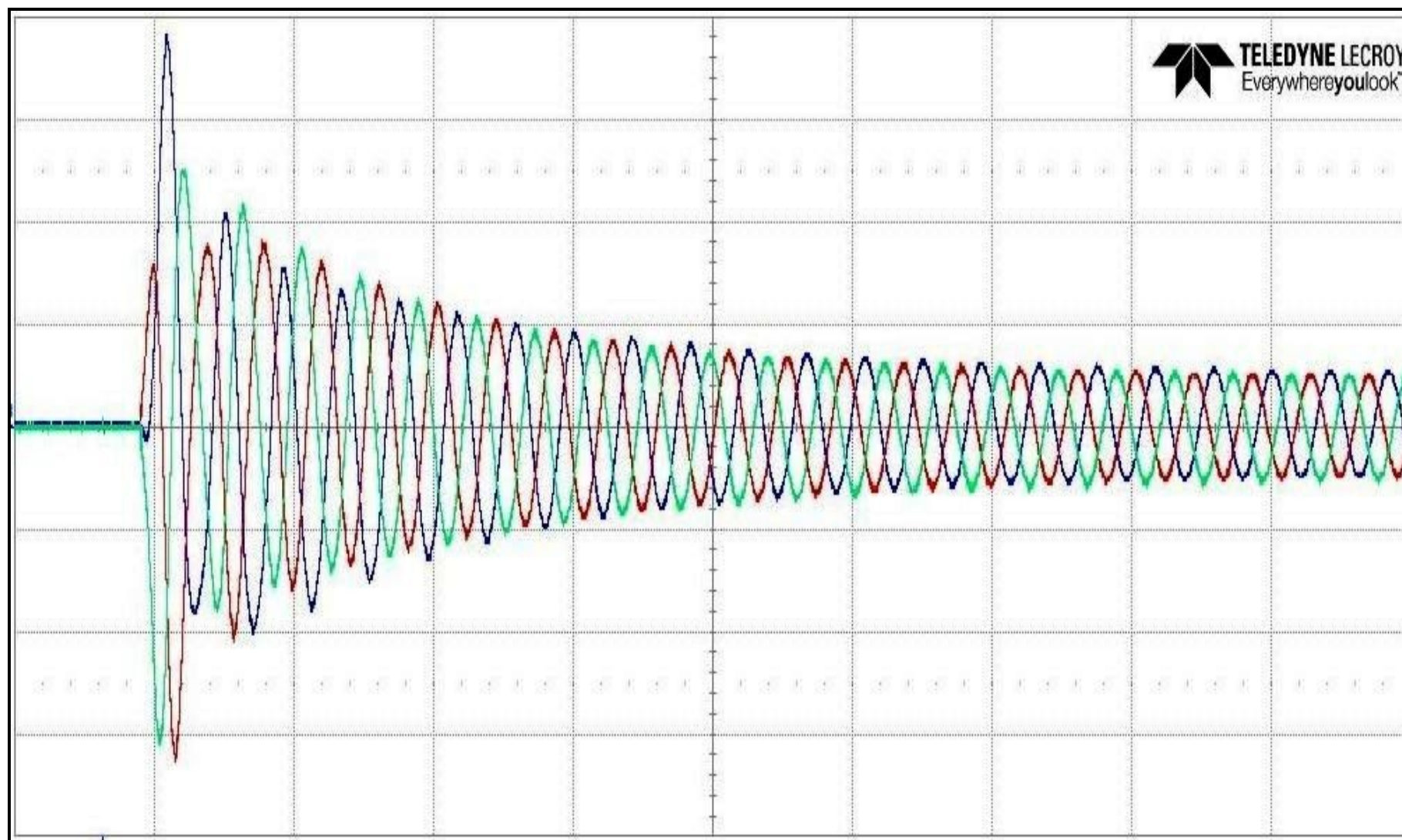
Tab. 24. - Změřené hodnoty pro P=5kW 1.SG

P=10kW													
I <sub>b</sub>	2,5	2,9	3,6	4,4	4,9	5,3	6,6	7,6	8,3	8,9	9,6		
I	20	18,4	16,8	15,6	14,8	14,8	15,2	16	17	18	20		

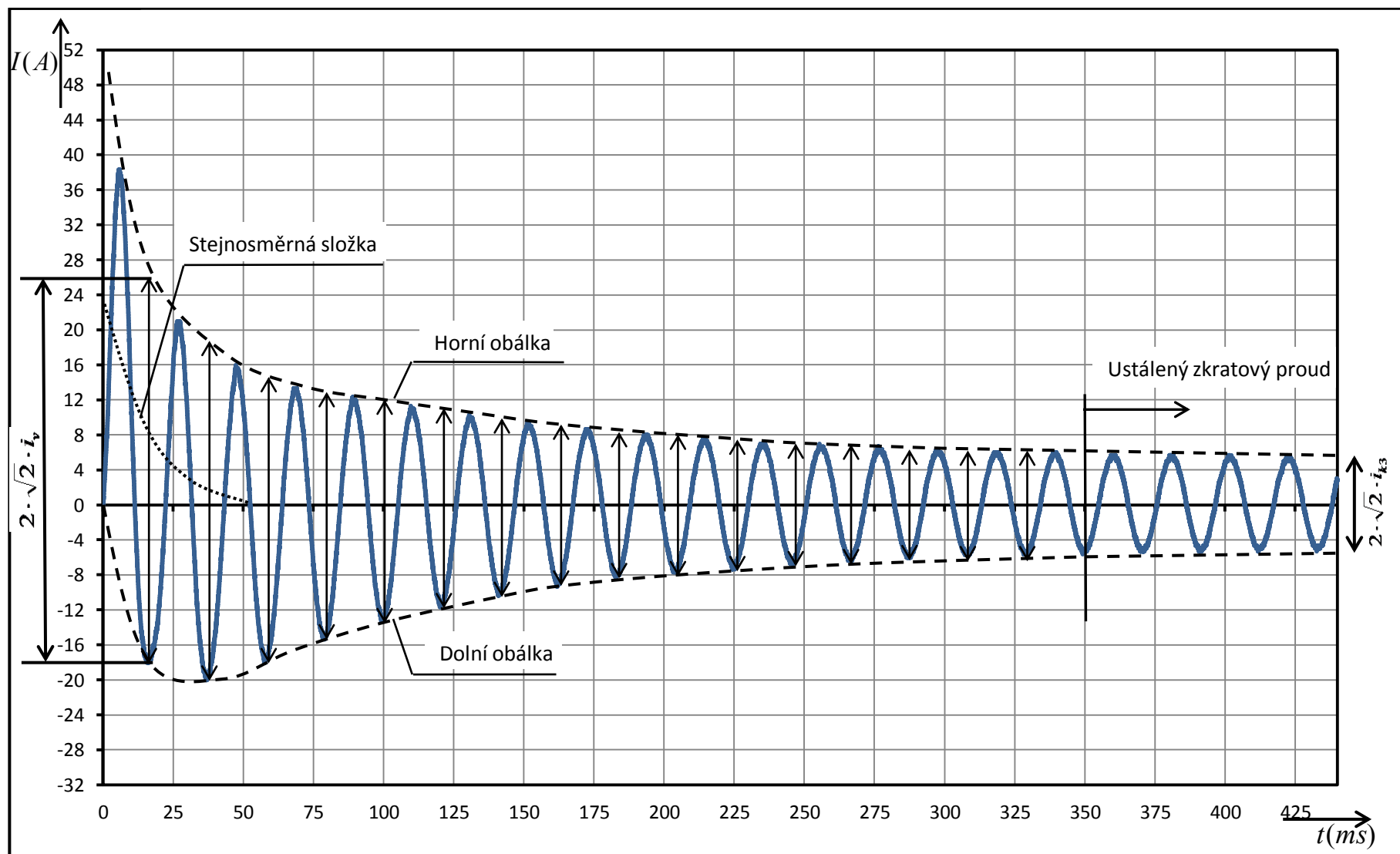
Tab. 25. - Změřené hodnoty pro P=10kW 1.SG

**Příloha N: Graf průběhu V-křivek pro 1. SG**

Obr. 27. - Graf průběhu V-křivek 1.SG

**Příloha O: Průběh 3-fázového zkratového proudu 2.SG vyexportovaný z osciloskopu při 30% nabuzení**

Obr. 28. - Průběh 3-fázového zkratového proudu 2.SG

**Příloha P: Upravený časový průběh zkratového proudu jedné fáze se stejnosměrnou složkou 2.SG**

Obr. 29. - Průběh zkratového proudu jedné fáze a obalové křivky zkratového proudu

**Příloha Q: Naměřené a vypočtené hodnoty pro zkratový proud 2.SG****Naměřené hodnoty před zkratem pro 2. SG:**

$$n = 1000 \text{ ot} / \text{min} \quad I_b = 0,8 \text{ A} \quad U = 120 \text{ V}$$

**Maximální hodnota rozkmitu pro 2. SG:**

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{3K} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 3,49 = 9,87 \text{ A}$$

Určení rozkmitu provedeme tak, že odečteme hodnotu v mm mezi obalovými křivkami ustáleného zkratového proudu viz příloha P Obr. 29 časový průběh zkratového proudu jedné fáze se stejnosměrnou složkou

**Určení měřítka pro 2. SG:**

$$\frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{3K}}{\text{rozkmit}} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 9,87}{18} = 0,548 \text{ A/mm}$$

**Výpočty a určení hodnot ze semilogaritmického grafu:**

Ze semilogaritmického grafu odečteme hodnoty pro výpočet  $i'_{k0}$  a  $i''_{k0}$

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot i'_{k0} = 27 \text{ A}$$

$$i'_{k0} = \frac{27}{2 \cdot \sqrt{2}}$$

$$i'_{k0} = \underline{\underline{9,54 \text{ A}}}$$

Určení přechodné časové konstanty  $\tau_d'$

$$0,368 \cdot i'_{k0} = 0,368 \cdot 9,54 = \underline{\underline{3,51 \text{ A}}}$$

$$\text{- Z grafu odečteme } \tau_d' = 0,208 = \underline{\underline{208 \text{ ms}}}$$

Rozdílem maxima  $I'_{km}$  a extrapolované hodnoty  $2 \cdot \sqrt{2} \cdot i'_{k0}$  dostáváme

$$I'_{km} = 31 A$$

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot i'_{k0} = 27 A$$

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot i''_{k0} = I'_{km} - 2 \cdot \sqrt{2} \cdot i'_{k0} = 31 - 27 = \underline{\underline{4 A}}$$

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot i''_{k0} = 4 A$$

$$i''_{k0} = \frac{4}{2 \cdot \sqrt{2}}$$

$$i''_{k0} = \underline{\underline{1,41 A}}$$

Určení rázové časové konstanty  $\tau_d''$

$$0,368 \cdot i''_{k0} = 0,368 \cdot 1,41 = \underline{\underline{0,52 A}}$$

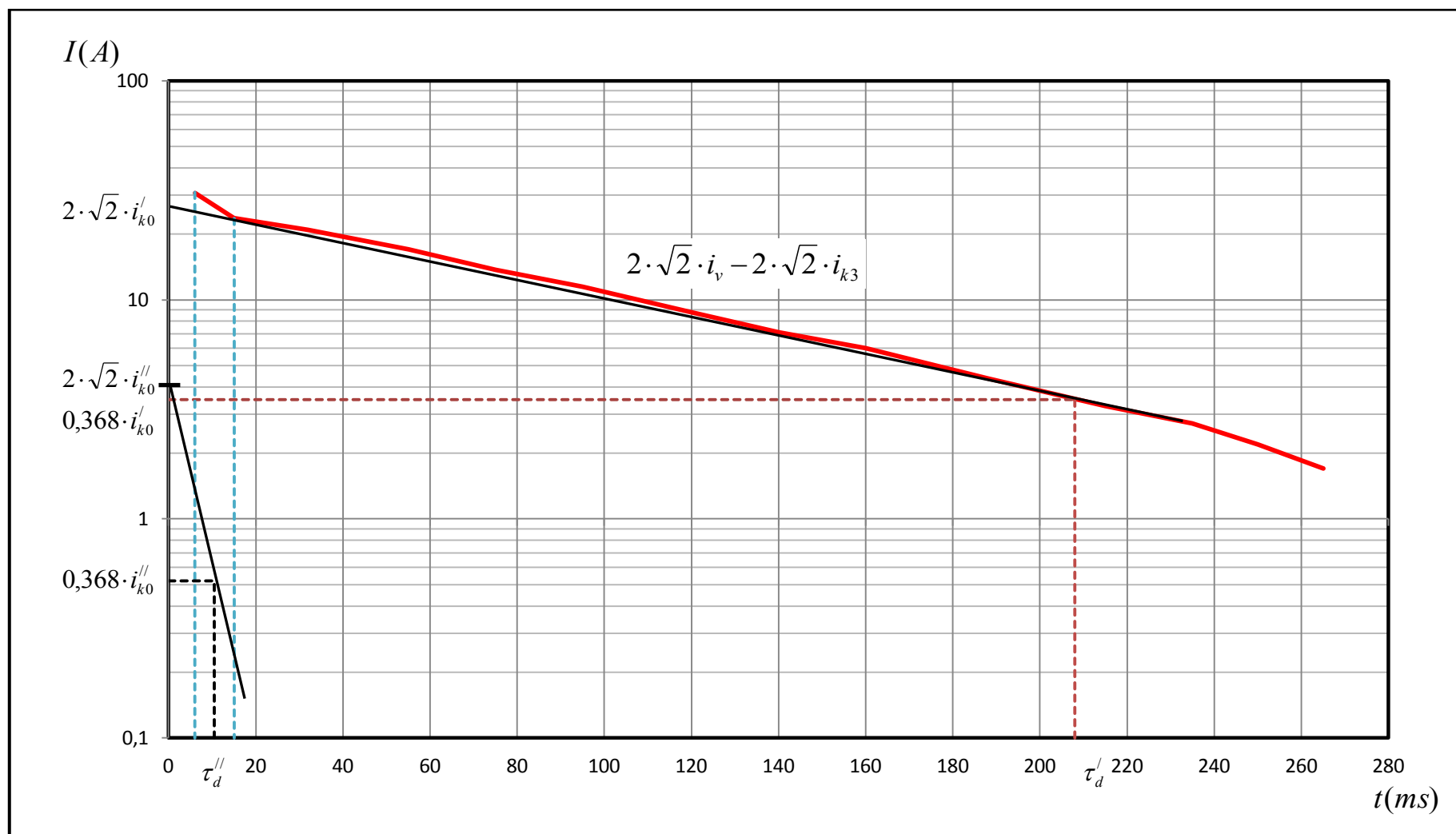
$$- \text{ Z grafu odečteme } \tau_d'' = 0,010 = \underline{\underline{10 ms}}$$

Určení přechodné reaktance  $X'_d$

$$X'_d = \frac{U_{1fN}}{I_{k3} + I'_{k0}} = \frac{120}{3,49 + 9,54} = \underline{\underline{9,2 \Omega}}$$

Určení rázové reaktance  $X''_d$

$$X''_d = \frac{U_{1fN}}{I_{k3} + I'_{k0} + I''_{k0}} = \frac{120}{3,49 + 9,54 + 1,41} = \underline{\underline{8,31 \Omega}}$$

**Příloha R: Rozbor oscilogramu zkratového proudu pro 2. Synchronní generátor:**

Obr. 30. - Určení reaktancí a časových konstant zkratového proudu 2.SG